



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# POVRCHOVÉ ÚPRAVY SOUČÁSTÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ

SURFACE TREATMENTS PARTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JOSEF TOMAN

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ MARŠÁLEK

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/12

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Josef Toman

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Povrchové úpravy součástí spalovacích motorů**

v anglickém jazyce:

### **Surface treatments of parts internal combustion engines**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracovat přehled používaných povrchových úprav v oblasti spalovacích motorů. Popsat používané technologie, charakteristiky procesů, případné dokončovací operace a následné aplikace tohoto povrchování na jednotlivé komponenty spalovacích motorů.

Cíle bakalářské práce:

- Úvod

- Rozbor konstrukce spalovacího motoru za účelem lokalizace povrchovaných součástí

- Přínosy povrchových úprav, důvody jejich tvorby

- U jednotlivých druhů povrchových úprav popsat

- Technologii

- Charakteristiku procesu

- Dokončovací operace

- Aplikace

- Závěr

Seznam odborné literatury:

- [1] RAUSCHER , J. Vozidlové motory , studijní opora ve formátu pdf . Brno
- [2] OBR, Ladislav. Funkční chromování. MM Průmyslové spektrum. Duben 2008, 12, 4, s. 66-67.
- [3] ZHANG, Sam. Handbook of nanostructured thin films and coatings : Functional properties. 2. vyd. Boca Raton : CRC Press, 2010. 410 s. ISBN 978-1-4200-9395-7.
- [4] INGHAM; HERBERT, S. Sprayed metallic coatings for automotive aluminium castings. New York : S. A. E., 1958. 4 s.
- [5] ZAHÁLKA, František; ENŽL, Radek . Progresivní řešení náhrady tvrdého chromování. MM Průmyslové spektrum. 13.4.2005, 4 s.

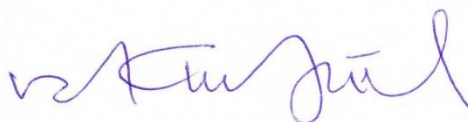
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Maršálek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 16.11.2011



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan



## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je odbornou rešerší zabývající se nejčastěji používanými druhy povrchových úprav aplikovaných na namáhané součásti spalovacích motorů. Uvádí jejich rozdělení, přínosy automobilovému průmyslu a důvody jejich tvorby. Dále se zaměřuje na definice používaných technologií, charakteristiky procesů a povlaků, dokončovací operace následující po povrchových úpravách a aplikace těchto úprav na součásti spalovacích motorů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Povrchová úprava, spalovací motor, termický nástřik, galvanický, dokončovací operace, povlak.

## ABSTRACT

This bachelor thesis is a professional research dedicated to the most frequently used surface treatments, applied to the stressed parts of internal combustion engines. The thesis also refers to surface treatments classification, benefits for the automotive industry and reasons for their development. Further it focuses on definitions of the technologies used, characteristics of processes and coatings, finishing operations after surface treatments and application of these treatments on the parts of internal combustion engines.

## KEYWORDS

Surface treatment, combustion engine, thermal spraying, galvanic, finishing operation, coating.



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMAN, J. *Povrchové úpravy součástí spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 49 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Maršálek.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Maršálka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2012

.....

Josef Toman



## PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Ondřeji Maršálkovi za odborné vedení bakalářské práce a jeho velice cenné rady a připomínky. Dále bych také chtěl poděkovat své rodině a všem přátelům, kteří mě neocenitelně podporovali v průběhu studia.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Rozbor konstrukce spalovacího motoru za účelem lokalizace povrchovaných součástí ..	11
2 Přínosy povrchových úprav, důvody jejich tvorby.....	13
3 Rozdělení povrchových úprav .....	14
4 Chemické povrchové úpravy .....	15
4.1 Fosfátování.....	15
4.1.1 Technologie .....	15
4.1.2 Charakteristika procesu .....	16
4.1.3 Dokončovací operace .....	16
4.1.4 Aplikace.....	16
4.2 Chemické niklování (bezproudové).....	17
4.2.1 Technologie .....	17
4.2.2 Charakteristika procesu .....	18
4.2.3 Dokončovací operace .....	18
4.2.4 Aplikace.....	18
5 Elektrochemické povrchové úpravy .....	19
5.1 Elektrochemická oxidace hliníku, tzv. eloxování .....	19
5.1.1 Technologie .....	19
5.1.2 Charakteristika procesu .....	19
5.1.3 Dokončovací operace .....	20
5.1.4 Aplikace.....	20
5.2 Galvanické chromování .....	20
5.2.1 Technologie .....	21
5.2.2 Charakteristika procesu .....	21
5.2.3 Dokončovací operace .....	22
5.2.4 Aplikace.....	23
5.2.5 Ekologická problematika tvrdého chromování.....	23
5.3 Galvanické niklování .....	24
5.3.1 Technologie .....	24
5.3.2 Charakteristika procesu .....	25
5.3.3 Dokončovací operace .....	25
5.3.4 Aplikace.....	26
5.4 Kompozitní povlaky .....	26
5.4.1 Disperzní fáze .....	27
5.4.2 Kovové matrice.....	27





6	Chemicko-tepelné nanášení povlaků .....	28
6.1	Nitridace.....	28
6.1.1	Technologie plazmové nitridace.....	28
6.1.2	Charakteristika procesu plazmové nitridace.....	29
6.2	Karbonitridace .....	30
6.2.1	Technologie karbonitridace .....	30
6.2.2	Charakteristika procesu karbonitridace .....	31
6.3	Dokončovací operace nitridace a karbonitridace .....	31
6.4	Aplikace .....	31
7	Termické nástřiky (metalizace) .....	32
7.1	Technologie termických nástřiků.....	32
7.1.1	Technologie termického nástřiku plamenem.....	33
7.1.2	Technologie detonačního termického nástřiku.....	33
7.1.3	Technologie HVOF nástřiku .....	34
7.1.4	Technologie termického nástřiku elektrickým obloukem .....	35
7.1.5	Technologie termického nástřiku plazmou .....	35
7.2	Charakteristiky termických nástřiků .....	36
7.2.1	Charakteristika nástřiku plamenem .....	37
7.2.2	Charakteristika detonačního nástřiku .....	38
7.2.3	Charakteristika nástřiku HVOF .....	38
7.2.4	Charakteristika termického nástřiku elektrickým obloukem.....	38
7.2.5	Charakteristika termického nástřiku plazmou .....	39
7.3	Dokončovací operace termických nástřiků.....	40
7.4	Aplikace termických nástřiků .....	40
8	Fyzikální metody nanášení povlaků ve vakuu (PVD).....	41
8.1	Technologie vakuového naprašování.....	41
8.2	Charakteristika vakuového naprašování .....	42
8.3	Dokončovací operace.....	43
8.4	Aplikace .....	43
	Závěr.....	44
	Použité informační zdroje.....	45
	Seznam použitých zkratk .....	49



## ÚVOD

Vývoj spalovacích motorů v několika posledních desetiletích stále nabírá na obrátkách a je velmi pravděpodobné, že ještě několik desetiletí budou spalovací motory vyplňovat velkou část trhu s pohonnými jednotkami vozidel na celém světě.[38]

Od moderních spalovacích motorů je požadován vysoký objemový výkon při malé měrné hmotnosti a v co nejmenším zastavěném prostoru, nízká spotřeba paliva, vysoká spolehlivost a životnost při minimální údržbě a plnění přísných emisních limitů. Právě snaha o snižování emisních limitů akcelerovalo v posledních letech strmý růst vývoje spalovacích motorů. Přísné limity emisí výfukových plynů tlačí na výrobce spalovacích motorů, aby ze současných technologií dostali maximum. Na scénu se tak dostává mnoho inovací a vylepšení, které mohou výrazně napomoci k ekonomickému a ekologickému provozu současných spalovacích motorů a v konečném důsledku tak oddálit očekávaný nástup alternativních pohonů na trh.[5][38]

Ruku v ruce s vývojem spalovacích motorů jdou i požadavky kladené na součásti moderních spalovacích motorů, které se neustále zvyšují. Tím roste význam povrchových úprav součástí, které zajišťují především lepší mechanické vlastnosti povrchu těchto dílů.

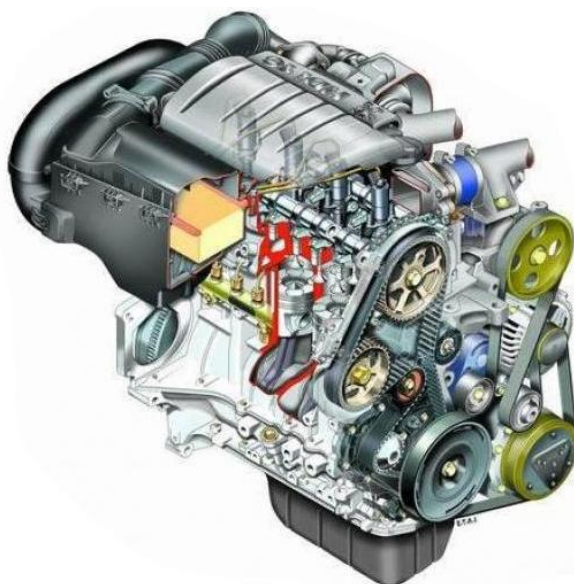
Použití povrchových úprav na namáhané součásti, jakými jsou například válce spalovacího motoru, pístní kroužky nebo ventily, přináší mnoho výhod spojených především s úspornějším provozem a delší životností spalovacích motorů. Povrchové úpravy přináší významnou úsporu na nákladech za základní materiál dílů, který může být zvolen méně kvalitní za předpokladu, že potřebné chemické a mechanické vlastnosti povrchu mu následně dodají právě povrchové úpravy. Další úsporu lze sledovat na materiálech bloků motorů. Díky povrchovým úpravám je možné používat bloky z hliníkových slitin Al-Si, namísto dříve používaných litinových bloků, čímž je dosaženo výrazného snížení hmotnosti motoru. Výhodou povlakovaných součástí jsou i velice nízké koeficienty tření společně s vysokou tvrdostí. Tyto vlastnosti snižují opotřebení těchto součástí a mechanické ztráty uvnitř motoru. Napomáhají tak ke snížení spotřeby paliva a mazacího oleje, tím i k nižším emisím výfukových plynů a vyšší životnosti spalovacích motorů.[5]



# 1 ROZBOR KONSTRUKCE SPALOVACÍHO MOTORU ZA ÚČELEM LOKALIZACE POVRCHOVANÝCH SOUČÁSTÍ

Čtyřdobý spalovací motor, ať už zážehový či vznětový, lze jako celek rozdělit do několika základních konstrukčních skupin [1]:

- skříň motoru (hlava válců, válce, kliková skříň, olejová jímka, víka),
- součásti klikového mechanismu (setrvačník, kliková hřídel, ojnice, pístní čepy, písty, pístní kroužky),
- rozvodové ústrojí (vačkový hřídel, mechanismus ovládání ventilů, ventily),
- zapalovací systém,
- zařízení pro tvorbu směsi (vstřikovací zařízení nebo karburátor, sací potrubí),
- pomocná zařízení (chlazení motoru, mazání, výfukové potrubí).



*Obr. 1 Částečný řez vznětovým motorem [29]*

Mezi nejvíce teplotně i mechanicky namáhané součásti patří díly klikového mechanismu, rozvodového ústrojí a válce motoru. U těchto dílů se také v největší míře používají různé druhy povrchových úprav za účelem zvýšení jejich únosnosti, prodloužení životnosti a usnadnění jejich záběhu. Zejména se jedná o písty, pístní kroužky, pístní čepy, ojnice, vačkový hřídel, klikový hřídel a válce (vložky) motoru.

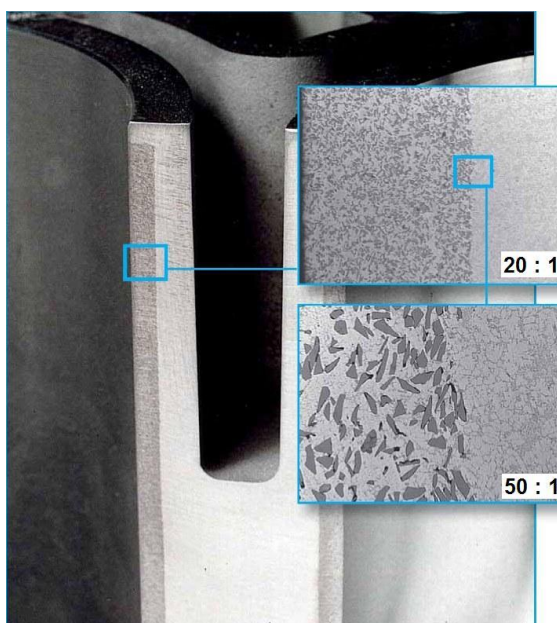


Příklad vhodného užití povrchových úprav je dobře vidět na výrobě bloků spalovacích motorů. Jsou v podstatě tři základní druhy bloků [5]:

- **monolitické** – nadeutektické slitiny Al-Si (ALUSIL),
- **quasi-monolitické** – povrchové úpravy nebo vkládané matrice z křemíkových vláken či krystalů (LOKASIL),
- **heterogenní** – suché či mokré vkládané vložky z šedé litiny, spékaných kovů nebo z nadeutektických slitin Al-Si.

Přestože toto rozdělení předkládá spíše základní náhled na používané materiály bloků, je v této rešerši uvedeno z toho důvodu, že povrchové úpravy lze nalézt především u quasi-monolitických bloků.

Heterogenní a monolitické bloky jsou vyrobeny z kvalitních materiálů, viz rozdělení výše, které již nepotřebují povrchové úpravy. Quasi-monolitické bloky se vyrábí dvojím způsobem. První způsob spočívá ve vkládání jader, která se skládají z keramických částecek nebo vláken, do kokil. Tyto jádra mají tvar dutých válců a speciální technologií tlakového lití (Squeeze Casting) je docíleno toho, že při odlévání prostoupí hliníková slitina skrz tyto vysoce porézní jádra. Po ztuhnutí a následném opracování tak vzniká potřebná struktura pracovního povrchu válce. Druhým způsobem výroby quasi-monolitických bloků je získání potřebných mechanických vlastností pracovního povrchu válce použitím povrchových úprav. Nejčastějšími způsoby nanášení odolného materiálu na povrchu válce jsou galvanické pokovení (Ni-SiC) nebo plasmatické nástřiky. Tyto povrchové úpravy jsou následně, kromě jiných úprav, popsány v této práci.[5]



Obr. 2 Řez válcem motoru s křemíkovou matricí (LOKASIL) [8]



## 2 PŘÍNOSY POVRCHOVÝCH ÚPRAV, DŮVODY JEJICH TVORBY

Cílem povrchových úprav je dosažení lepších vlastností povrchu, mezi které zejména patří korozní odolnost, zvýšená odolnost proti opotřebení, zlepšení kluzných vlastností, elektrických vlastností a v neposlední řadě zlepšení vzhledu součástí.[3]

Na spalovací motory je kladeno mnoho různých požadavků, které se rok od roku zvyšují a nabývají na své váze. Například výrobci spalovacích motorů i dodavatelé dílů se snaží jít cestou co možná nejmenších nákladů a dosažení vysoké kvality. Tato snaha se podepisuje na snižování hmotností funkčních součástí za účelem úspory na materiálu. Dalším činitelem majícím vliv na výrobu spalovacích motorů jsou instituce, jakou je např. Ministerstvo životního prostředí. Tyto instituce udávají určitá omezení týkající se především ekologických hledisek výroby a provozu. Jedná se hlavně o snižování emisních limitů výfukových plynů nebo i omezování limitů škodlivých látek používaných pro určité technologie výroby nebo povrchových úprav součástí spalovacích motorů jako je např. chromování. V neposlední řadě se jedná také o nároky, které klade na spalovací motor jeho uživatel. Požadavky uživatele na spalovací motor jsou zejména spolehlivý, dlouhodobý, co možná nejvíce bezúdržbový a ve značné míře také ekonomický provoz. Velkou část těchto požadavků je možné splnit právě díky používání povrchových úprav funkčních součástí spalovacího motoru. Cenným přínosem povrchových úprav je možnost nanášení tvrdých a odolných vrstev na povrchy, které přicházejí do styku s jinými částmi motoru a podstatně tak snižují jejich opotřebení. Právě snižováním míry opotřebení funkčních dvojic lze redukovat postupné zhoršování technických, ekonomických i ekologických parametrů, které mají ve svých důsledcích i přímý vliv na životnost a spolehlivost spalovacích motorů. Nanášení odolných povlaků za účelem snížení tření a opotřebení funkčních částí motoru je tedy možná cesta vedoucí k úspěšnému plnění výše uvedených požadavků.[17]



### 3 ROZDĚLENÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV

Povrchové úpravy součástí jsou technologické procesy, kterými dosahujeme změny mikrogeometrie povrchu, změny struktury povrchových vrstev nebo vytvoření nových povrchových vrstev, které mají odlišné chemické složení případně fyzikální vlastnosti.[3]

#### **POVRCHOVÉ ÚPRAVY DĚLÍME PODLE NÁSLEDUJÍCÍCH KRITÉRIÍ [3]:**

Podle účelu, za kterým jsou vytvářeny:

- čištění a předběžné úpravy,
- povrchové úpravy zvyšující korozní odolnost,
- povrchové úpravy zajišťující finální vzhled výrobku,
- povrchové úpravy, kterými se dosahuje specifických vlastností povrchu.

Podle charakteru vytvořené povrchové vrstvy:

- anorganické
  - kovové,
  - oxidické,
  - keramické, sklovité,
- organické
  - nátěrové,
  - plastové,
  - konzervační.

Podle způsobu, kterým je povrchová vrstva vytvořena:

- chemickými reakcemi,
- galvanickými (elektrochemickými) procesy,
- využitím difuze,
- ve vakuu,
- chemicko-tepelným zpracováním,
- máčením, poléváním,
- tepelným nástřikem,
- plátováním atd.



## 4 CHEMICKÉ POVRCHOVÉ ÚPRAVY

### 4.1 FOSFÁTOVÁNÍ

Fosfátování je jednou z nejvíce používaných metod chemické úpravy povrchu kovů. Při fosfátování se na povrchu kovu tvoří vrstva nerozpustných fosforečnanů, která je souvislá a dobře zakotvená k povrchu upravovaného kovu. Jako fosfatizační lázně se nejčastěji používají přípravky na bázi kyselého fosforečnanu zinečnatého, zinečnato-vápenného a manganatého.[3]

Výsledná fosfátová vrstva je tvořena krystalickými fosforečnany, které jsou nerozpustné ve vodě. Vrstva je porézní a většinou se nepoužívá jako konečná povrchová úprava.[3]

#### 4.1.1 TECHNOLOGIE

Princip fosfátování spočívá v přeměně rozpustného dihydrogenfosforečnanu, který tvoří hlavní složku fosfatizační lázně na nerozpustný hydrogenfosforečnan a na fosforečnan příslušného kovu, který vzniká reakcí kovového povrchu s fosfatizačním přípravkem. Nejprve proběhne reakce, při které kyselina obsažená v lázni rozpouští kov za současného vzniku vodíku.



Díky této reakci dochází na styčné ploše kovu a fosfatizační lázně k úbytku volné kyseliny, tím zvýšení pH v lázni a porušení hydrolytické rovnováhy ve fosfatizační lázni. V důsledku toho dojde k současné oxidaci a redukci hydrogenfosforečnanu, jejichž produkty jsou nerozpustný fosforečnan a volná kyselina fosforečná.



Takto vzniklá volná kyselina fosforečná obnoví rovnováhu v lázni. Na povrchu povlakované součásti krystaluje fosforečnan zinečnatý a vytváří tak ochrannou vrstvu.[2]



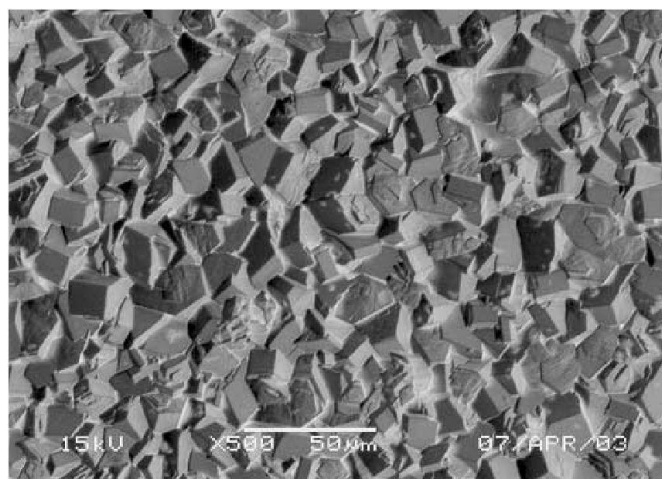


#### 4.1.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU

Fosfátové vrstvy se běžně aplikují na upravovaný povrch ponorným procesem nebo postřikem. Velikost van, ve kterých je umístěna fosfatizační lázeň se odvíjí od velikosti povlakovaných součástí. V závislosti na typu, velikosti a množství mohou být součásti umístěny na stojany nebo do košů.[3][30]

Kvalita fosfátové vrstvy je velmi závislá na kvalitě přípravy povrchu. Hrubě opracovaný povrch způsobuje tvorbu hrubé krystalické vrstvy. Také stupeň odmaštění povrchu ovlivňuje kvalitu fosfátování.[3]

Celý proces lze urychlit přidáním tzv. urychlovačů do lázně. Urychlovače bývají součástí moderních fosfatizačních lázní. Nejčastěji se jedná o dusičnany, dusitany nebo chlornany. Hlavním úkolem urychlovačů je zajištění stability lázně. Mají ovšem také příznivý vliv na snížení pracovní teploty procesu fosfátování. Jestliže např. při ponorném fosfátování probíhal proces bez urychlovačů za teplot 95 až 98 °C po dobu 45 až 60 minut, s využitím urychlovačů obsažených v lázni bude takovýto proces probíhat za teplot 50 až 60 °C po dobu 5 až 10 minut.[2]



Obr. 3 Struktura mangan-fosfátové vrstvy [31]

#### 4.1.3 DOKONČOVACÍ OPERACE

Vzhledem k nízké tvrdosti mangan-fosfátové vrstvy lze předpokládat, že pro dokončovací operace dílů opatřených tímto povlakem jako jsou písty, pístní kroužky a dřívky ventilů je postačující běžné broušení bez použití speciálních brusných materiálů používaných pro tvrdé povrchové vrstvy.

#### 4.1.4 APLIKACE

V konstrukci spalovacích motorů se používá manganových fosfátových vrstev za účelem zlepšení záběhu pístů a pístních kroužků. Vrstva fosforečnanu manganatého se vyznačuje větší tvrdostí než fosfátové vrstvy s obsahem zinku a má i větší nasáklivost oleje.





Fosfátová vrstva příznivě ovlivňuje dobu záběhu motoru, zároveň snižuje opotřebení součástí i hlučnost motoru. Fosfátové vrstvy je také využíváno pro zlepšení přilnavosti grafitové vrstvy na povrch pláště pístu.[2][5]

## 4.2 CHEMICKÉ NIKLOVÁNÍ (BEZPROUDOVÉ)

Jedná se o elektrochemický proces, při kterém nastává vylučování kovů na základním materiálu za pomoci elektrického proudu vzniklého vlivem rozdílných elektrochemických potenciálů mezi roztokem solí vylučovaného kovu a pokovovaným materiálem.[3]

Podstatou metody je vylučování více ušlechtilého kovu na povrch méně ušlechtilého kovu. Bezproudové pokovování má výhodu v jednoduchosti zařízení a technologického postupu. Největší nevýhodou je malá tloušťka povlaku v porovnání s galvanickým pokovováním za stejný čas. Ovšem výhodou chemické niklování ve srovnání s galvanickými procesy je větší hloubková účinnost, čehož se využívá např. při pokovování různých dutin a členitých povrchů.[3][36]

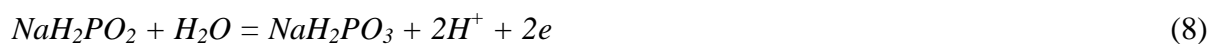
### 4.2.1 TECHNOLOGIE

Chemické niklování je autokatalytická reakce používaná k nanesení vrstvy niklu a fosforu na základní materiál.[17]

K rozšíření této metody došlo teprve po zavedení redukčního způsobu. Chemické niklování patří k nejčastějším způsobům chemického pokovování, a to díky propracované technologii a využitelnosti chemického niklování v mnoha aplikacích. Používají se dva druhy niklovacích lázní, které mohou být slabě kyselé nebo slabě alkalické. Kyselé lázně jsou více rozšířené, avšak alkalické dávají proti lázním kyselým povlak velmi lesklý a s nižším obsahem fosforu. Ovšem vylučovací rychlost v alkalických lázních je nižší. Alkalické lázně se používají pro niklování hliníku a jeho slitin. Hlavními složkami niklovacích lázní jsou [2]:

- **Nikelnaté ionty  $Ni^{2+}$**  obsažené v nikelnaté soli (např. síran nikelnatý, uhličitán nikelnatý, chlorid nikelnatý a nejnověji fosfornan nikelnatý).
- **Redukční činidla** sloužící jako zdroj fosforu v povlaku a k redukci nikelnatých iontů na kovový nikl. Převážně jsou používány fosfornan sodný, draselný nebo nikelnatý.
- **Komplexotvorná činidla** jsou v lázni pro udržení pH a zabraňují srážení fosforitanu nikelnatého. Nevýhodou je, že snižují rychlost pokovování.
- **Urychlovače** aktivující fosfornanové ionty a tím zvyšují vylučovací schopnost niklu.
- **Stabilizátory** zabraňující vylučování niklu na mechanických nečistotách v lázni. Používají se sloučeniny např. arzenu, molybdenu, vizmutu a siřníku olova.

Základní reakce v alkalické niklovací lázni [36]:





#### 4.2.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU

Vyloučený povlak není tvořen čistým niklem, ale je složitou sloučeninou zejména niklu a fosforu. Jako nejvýhodnější poměr niklu a fosforu je považováno složení s podílem 8,7 % P, při kterém se nevyskytuje poróznost. Povlak chemicky vyloučeného niklu má vysokou přilnavost k základnímu materiálu a jeho odolnost proti korozi je větší v porovnání s povlaky vyloučenými galvanicky. Následným tepelným zpracováním je možno zvýšit tvrdost vzniklých povlaků až na 1200 HV.[2]

Použitím lázní s nižším obsahem fosforu (2 až 4 % P) lze u vyloučených vrstev dosáhnout vyšší tvrdosti než u lázní se středním obsahem fosforu až o 30 až 40%. Dostatečné tvrdosti nanesené vrstvy se docílí bez nutnosti následného tepelného vytvrzování, což je výhoda u pokovovaných materiálů, které špatně snášejí vysoké teploty. Jedná se o materiály obsahující např. Cu nebo Al.[22]

Dalšího zvýšení přilnavosti vylučovaného povrchu je možno dosáhnout zdrsněním povrchu nebo předehřevem součásti před vložením do niklovací lázně.[36]

Hlavními nevýhodami chemického vylučování niklu jsou poměrně vysoká teplota lázně během procesu a omezená životnost elektrolytu. Po určitém čase se lázeň tzv. vyčerpá a je nutno ji vyměnit za novou. Vysoká teplota chemického niklování (kolem 90 °C) vyžaduje značné nároky na výrobní zařízení. Při těchto teplotách dochází ke značnému vypařování vody a vzniklá pára pak silně korozivně napadá zařízení. Tato nevýhoda je v poslední době řešena novými druhy elektrolytu s obsahem fosforu, který se vylučuje společně s niklem za nižších teplot (kolem 50 °C) a zároveň snižuje v povlaku vnitřní pnutí.[3]

#### 4.2.3 DOKONČOVACÍ OPERACE

Z podobných vlastností povlaků vytvořených chemickým niklováním a galvanickým pokovením, což je možno usoudit ze stejného uplatnění v aplikacích na součástech spalovacích motorů, lze předpokládat, že i dokončovací operace následující po těchto povrchových úpravách budou velice podobné. Proto jsou dokončovací operace tohoto druhu povrchových úprav podrobněji popsány v kapitole 5.2.3.

#### 4.2.4 APLIKACE

Chemické niklování se stejně jako galvanické chromování uplatňuje jako ochrana dna pístu, horního můstku, případně drážky pro první pístní kroužek před poškozením vznikajícím vlivem detonačního hoření. Tloušťka niklové vrstvy bývá 10 až 15 μm.[5]



## 5 ELEKTROCHEMICKÉ POVRCHOVÉ ÚPRAVY

### 5.1 ELEKTROCHEMICKÁ OXIDACE HLINÍKU, TZV. ELOXOVÁNÍ

Elektrochemická oxidace hliníku je jednou z nejběžnějších a nejvíce používaných metod povrchové ochrany hliníku a jeho slitin.[3]

#### 5.1.1 TECHNOLOGIE

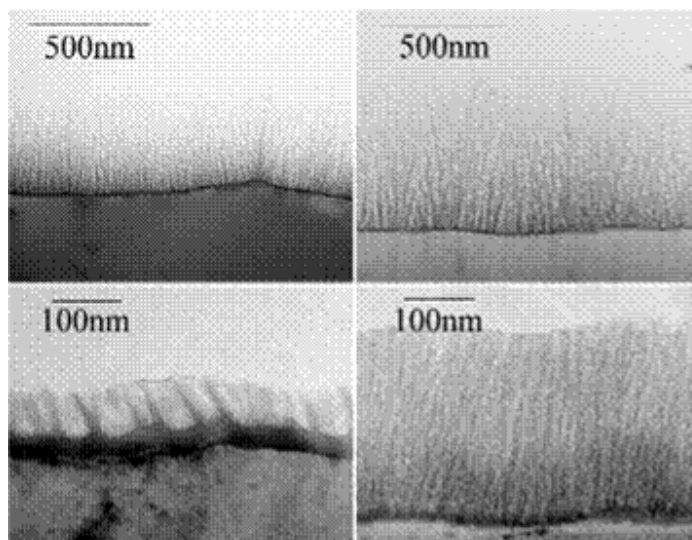
Základní princip eloxování spočívá v anodické oxidaci, při které dochází k rozpouštění hliníku na povrchu anody. Dochází k tvorbě hlinitých solí a po dosažení neutrálního pH lázně k jejich následné hydrolýze. Na povrchu povlakované součásti tak vzniká povlak nerozpustného hydroxidu hlinitého  $\text{Al}(\text{HO})_3$ . Povlak hydroxidu hlinitého následně zabraňuje průchodu elektrického proudu a vlivem jeho odporu dochází ke značnému ohřevu kovu. V důsledku značného zahřátí se vrstva dehydratuje a vzniká vrstva oxidu hlinitého. Pokud tloušťka vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dosáhne takové hodnoty, že její elektrický odpor převýší rychlost anodického rozpouštění, dojde k zastavení tvorby kysličníkové vrstvy. Technologicky se vytváří ochranné vrstvy eloxováním v následujících roztocích [2][3]:

- kyselina sírová,
- kyselina chromová,
- kyselina šťavelová.

Pro anodickou oxidaci se výhradně používá stejnosměrný proud, z toho důvodu, že vrstvy vytvořené anodickou oxidací za použití střídavého proudu jsou tenčí a méně odolné. Eloxování střídavým proudem se provádí v aplikacích, kde jsou požadovány tenké a pružné vrstvy, které se nepoškodí ohybem.[3]

#### 5.1.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU

Před samotným eloxováním je třeba provést předběžné mechanické úpravy povrchu součásti s následným odmaštěním a mořením. Tvrdé eloxování se aplikuje na povrch povlakované součásti ponorným procesem. Tento způsob úprav povrchu se provádí v kyselině sírové za působení stejnosměrného proudu. Lázeň je nutné chladit na teplotu  $-5$  až  $+5$  °C a intenzivně míchat. Díky udržované nízké teplotě lázně dochází k lepší vodivosti oxidované vrstvy, čímž se zlepší hloubková účinnost celého procesu. Pro chlazení lázně lze použít směs ledu a solí nebo směs suchého ledu s acetonem. Při dostatečné kapacitě chladicí lázně je možné chladit pouze ledem s vodou. Vzniklé vrstvy jsou trvalé i za vyšších teplot a dobře odolné proti mechanickému opotřebení. U běžných vrstev bývá tvrdost 350 až 400 HV, tvrdé eloxované vrstvy dosahují tvrdosti 500 až 800 HV při tloušťce naneseného povlaku 0,025 až 0,075 mm (max. 0,150 mm).[2]



Obr. 4 Průřezy strukturou vrstvy  $Al_2O_3$  nanesené tvrdým eloxováním [13]

### 5.1.3 DOKONČOVACÍ OPERACE

Vzhledem k vysoké tvrdosti povlaků vytvořených tvrdým eloxováním je nutné pro konečnou povrchovou úpravu použít brusné kotouče obsahující zrna ze superabrazivních materiálů jako jsou syntetický diamant D nebo kubický nitrid boru CBN. Při broušení diamantovými kotouči se používá zrnitost 40 až 80  $\mu m$  a dosahuje se tak drsnosti povrchu až 0,2 Ra. Kotouče vyrobené z CBN mají zrnitost pohybující se v rozmezí 28 až 80  $\mu m$  a při velmi jemném broušení lze dosáhnout drsnosti povrchu až 0,05 Ra.[39]

### 5.1.4 APLIKACE

Ochrana tvrdým eloxováním se používá u součástí vyžadujících vyšší tvrdost a odolnost proti otěru povrchu. V konstrukci spalovacích motorů se využívá u pístů naftových spalovacích motorů s přímým vstřikem paliva, kde zabraňuje vzniku únavových trhlinek, které vznikají vlivem značného tepelného a mechanického namáhání a vlivem tepelných šoků vyvolávaných stykem studeného nasávaného vzduchu s horkým povrchem pístu. Dále je eloxování využíváno jako úprava povrchu pro povrch drážky prvního pístního kroužku.[5]

## 5.2 GALVANICKÉ CHROMOVÁNÍ

Chromové povlaky se používají pro součásti, u kterých je požadováno zlepšení vzhledu a ochrany proti korozi. Používají se také pro zvýšení povrchové tvrdosti a odolnosti proti otěru. Tyto povlaky je možné nanášet na základní materiál, kterým může být ocel, litina, mosaz, měď nebo některé druhy nerezových ocelí. Galvanické chromování lze tedy rozdělit na dvě základní skupiny [3][37]:

- ozdobné chromování,
- tvrdé chromování.



U povrchových úprav týkajících se funkčních součástí spalovacích motorů mluvíme většinou o tvrdém chromování.

### 5.2.1 TECHNOLOGIE

Na rozdíl od ostatních způsobů elektrolytického pokovování se proces galvanického chromování liší tím, že chrom není dodáván do lázně rozpouštěním chromové anody, ale je ve formě aniontu v elektrolytu tvořeného kyselinou chromovou. Pokud by byla jako zdroj chromu v lázni chromová anoda, docházelo by k tvorbě chromu ve formě trojmocného kationtu  $\text{Cr}^{3+}$  což by ve větším množství bylo nevhodné. Poněvadž pro vylučování povlaku na povrchu součásti je v lázni nutná přítomnost chromu ve formě šestimocné.[2][3]

Jako materiál nerozpustných anod v chromovacích lázních se většinou používá olovo obohacené různými legurami (Sb, Sn ap.), ovšem nejvýhodnější je použití tzv. chrominových anod (olovo legované stříbrem), které jsou schopny pracovat při vyšších proudových hustotách a zároveň nejsou náchylné k pasivaci. Zdrojem kyseliny chromové  $\text{H}_2\text{CrO}_4$  bývá oxid chromový  $\text{CrO}_3$ , který se smísí s vodou. Oxid chromový se do lázně přidává i během procesu chromování, aby se zajistilo stálé složení lázně. Chromovací lázně obsahují určité množství trojmocného chromu dodávané při nasazování lázně. Množství nasazeného trojmocného chromu  $\text{Cr}^{3+}$  je udržováno rovnováhou mezi redukcí  $\text{Cr}^{6+}$  na katodě a oxidací  $\text{Cr}^{3+}$  na anodě. Vlivem redukce oxidu chromového na katodě vznikají neprodyšné filmy, které následně zabraňují difuzi dalších chromových iontů ke katodě.[2]

### 5.2.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU

Galvanické chromování se na součásti aplikuje ponorem do lázni, jejichž složení může být odlišné dle vlastností požadovaného chromového povlaku. Chromovací lázně obsahující kyselinu sírovou se vyznačují svou vyšší stálostí a jsou méně agresivní. Naopak chromovací lázně obsahující fluoridy a fluorokřemičitany jsou výhodné díky svému vyššímu proudovému výtěžku. Celý proces vylučování chromu je rychlejší v porovnání s lázněmi, které obsahují kyselinou sírovou, což příznivě ovlivňuje ekonomickou stránku galvanického chromování. Jejich používání má ovšem i několik nevýhod. Přítomnost cizích aniontů v lázni, především síranů, fluoridů a fluorokřemičitanů, ovlivňuje poréznost katodového filmu. Při používání galvanického chromování vznikají problémy týkající se zneškodňování odpadních vod.[2]

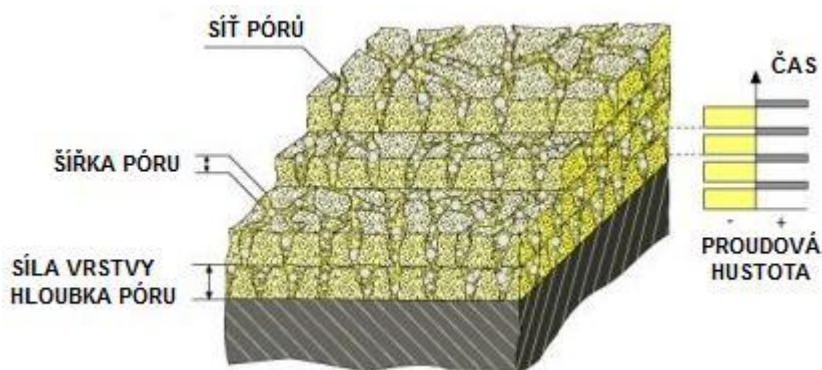
Výsledné vlastnosti chromového povlaku jsou negativně ovlivněny vznikem vodíku, který vzniká při vylučování chromu na katodě. Reakcí chromu s vodíkem vznikají velmi labilní hydridy ( $\text{CrH}_2$ ,  $\text{CrH}_3$  apod.). Jejich následným rozkladem vzniká vodík, který je zabudován do vyloučeného chromového povlaku a zvyšuje jeho tvrdost a křehkost. Přítomnost vodíku ve chromovém povlaku vyvolává objemové změny, které vedou k velkým vnitřním pnutím, jež mají za následek vznik většího či menšího počtu trhlinek. Porušení soudržnosti povlaku vlivem trhlinek je možné ovlivnit použitím speciálních přísad nebo dodržením určitých pracovních podmínek.[2]

Speciálními typy povlaků tvrdého chromování vyvinuté firmou Goetze jsou povlaky s tvrdochromovou maticí obsahující velice tvrdé částice (keramické nebo diamantové).





Nazývají se CKS resp. GDC (Goetze Diamond Coating). CKS povlak obsahuje tvrdé částice oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o velikosti 0,5 až 5  $\mu\text{m}$ . Obsah oxidu hlinitého v povlaku se pohybuje v rozmezí 2 až 12 %. GDC povlak má v chromové matici obsaženy tvrdé částice diamantu (C) jejichž velikost je 0,1 až 2  $\mu\text{m}$  a jejich obsah v povlaku je od 0,5 do 2 %. Tvrdé částice oxidu hlinitého nebo diamantu jsou zakotveny v síti mikrotrhlinek po celém povrchu. Tyto mikrotrhliny jsou přes celou tloušťku povlaku u CKS a jen do určité hloubky u GDC povlaků. Díky extrémní tvrdosti oxidu hlinitého a diamantu dosahují tyto povlaky vysoké odolnosti proto opotřebení a tvrdosti 900 až 1200 HV.[18][40]



Obr. 5 Schéma chromové vrstvy vyztužené tvrdými částicemi [40]

Zlepšení přilnavosti chromového povlaku se dosahuje aktivací povrchu před vlastním chromováním. Nejčastěji se aktivace provádí přepólováním (anodickým leptáním) přímo v chromovací lázni, výhodnější je však provádět aktivaci ve staré, již znehodnocené lázni. Díky nízké hloubkové účinnosti chromovacích lázní se během procesu využívají přídatné přípravky s pomocnými katodami a anodami. Jako ochrana povrchů součástí, které nejsou určeny k chromování, se používají snímatelné laky nebo izolační pásy.[2]

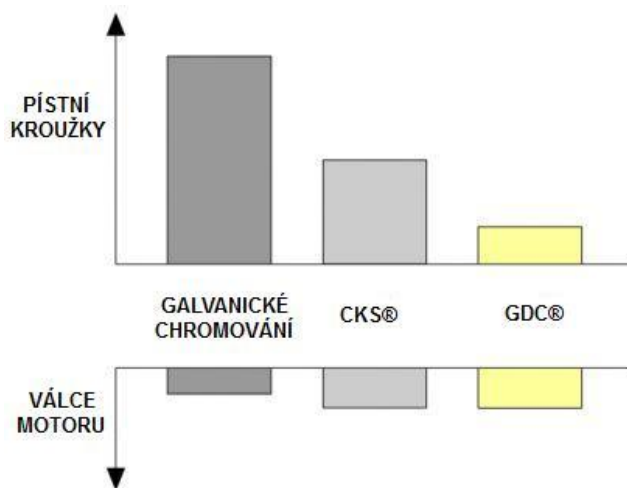
### 5.2.3 DOKONČOVACÍ OPERACE

Povrchy, na které je nanášena vrstva tvrdochromu, se dále musí opracovávat, aby dosáhly požadované kvality. Obecně u válců spalovacích motorů se jedná o technologii honování a u vnějších ploch (dířky ventilů, pístní kroužky) jsou dokončovací operace prováděny pomocí broušení. Vzhledem k vysoké tvrdosti povrchové vrstvy nelze používat běžné honovací a brusné materiály. Pro proces zpravidla třístupňového honování se podle katalogu firmy Atlantic tedy používají pro předhonování diamantové lišty. Mezihonování a honování načisto je prováděno pomocí honovacích kamenů z karbidu křemíku o velikosti zrn při mezihonování 95 až 120  $\mu\text{m}$  a při konečném honování se používají kameny se zrnitostí 17  $\mu\text{m}$ . Honovací kameny mohou být navíc napuštěny sírou nebo voskem. Díky tomuto napuštění vzniká během honování mezi obrobkem a honovacím kamenem kluzný film, který má pozitivní vliv na kvalitu obrobené plochy, opotřebení nástroje a odvod třísek. Broušení vnějších ploch se také provádí ve více stupních (zpravidla ve dvou stupních). Při broušení nahrubo i načisto jsou podle katalogu firmy Atlantic používány brusné kotouče z normálního korundu (stupeň čistoty 95 až 96 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) s pojivem ze syntetické pryskyřice. Velikost zrn

korundu při hrubování je 80  $\mu\text{m}$  a při broušení načisto se pohybuje kolem 48  $\mu\text{m}$  čímž lze dosáhnout drsnosti povrchu až 0,1 Ra.[23]

#### 5.2.4 APLIKACE

Tvrdé chromování se díky vysoké tvrdosti povlaků (900 až 1200 HV) používá hlavně pro zmenšení opotřebení a zvýšení životnosti součástí, nástrojů a měřidel. Díky tomu, že vytvořené povlaky mohou být až několik milimetrů silné a schopné dalšího opracování, nachází tvrdé chromování uplatnění také při opravách a renovaci součástí, jejichž tolerance je na dolní hranici rozměrů. Vrstva tvrdochromu se nanáší na písty zážehových motorů, u kterých se objevuje detonační spalování, kde zabraňuje místnímu poškození dna pístu, horního můstku nebo drážky pro první pístní kroužek. Technologie tvrdého chromování, CKS a GDC jsou velice často používané metody povrchových úprav pístních kroužků. Tloušťka nanesené vrstvy se u motorů osobních automobilů pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,18 mm a pro motory nákladních automobilů 0,16 až 0,25 mm. Chromované pístní kroužky se používají především jako první pístní kroužky, které jsou nejhůře mazány. Nesmějí se používat u tvrdě chromovaných styčných ploch válců, protože by v tom případě vykazovaly velmi špatné vlastnosti. Nanesení vrstvy tvrdochromu je aplikováno také na dříky ventilů spalovacích motorů kde snižuje opotřebení dříků ventilů a současně vylepšuje kluzné vlastnosti mezi vodítkem ventilu a dříkem ventilu. Pro zlepšení nasákavosti oleje chromové vrstvy se poslední část této vrstvy o tloušťce přibližně 0,05 mm opatřuje porézním chromem. Lepšího záběhu chromovaných součástí je možné docílit jejich pocínováním.[1][2][5][37]



Obr. 6 Porovnání opotřebení chromových povlaků na částech motoru [40]

#### 5.2.5 EKOLOGICKÁ PROBLEMATIKA TVRDÉHO CHROMOVÁNÍ

Bezesporu největšími nevýhodami tvrdého chromování je neekologičnost a jeho negativní vliv na zdraví pracovníků, kteří přicházejí do styku s vlastním procesem chromování. Hlavním důvodem těchto nevýhod je používání sloučenin obsahujících šestimocný chrom. Na rozdíl od kovového chromu a trojmocných chromových sloučenin, které nejsou toxické, jsou šestimocné chromové sloučeniny řazeny mezi toxické a průmyslové



karcinogenní látky, které jsou velice nebezpečné. Během procesu chromování se malé množství šestimocného chromu společně s dalšími prvky dostává do okolní atmosféry, se kterou následně přicházejí do styku pracovníci obsluhy. U dělníků pracujících v takto znečištěném ovzduší je zvýšené riziko kožních onemocnění a vážných onemocnění dýchacích cest. Na pokožce se mohou vyskytnout vředy, mohou se projevit alergické reakce jako např. zarudnutí a zduření pokožky a ve výjimečných případech je pozorována zvýšená citlivost vůči  $\text{Cr}^{6+}$  nebo  $\text{Cr}^{3+}$ . Šestimocný chrom je také považován za příčinu zvýšeného výskytu rakoviny plic u dělníků, kteří byli dlouhodobě vystaveni prostředí s jeho vysokými hodnotami koncentrace (stokrát až tisíckrát vyšší než v přirozeném prostředí). Při vdechnutí vzduchu obsahujícího chrom dochází k usazování částic chromu v plicích. Chrom, který se usazuje v horní části plic je vylučován kašláním. To ovšem neplatí o chromu, který se dostává do spodní části plic. Ten pravděpodobně zůstane déle a část ho pronikne z plic do krve. Rakovina plic se může projevit dlouho poté, kdy došlo k působení chromu na plíce pracovníka. Z těchto důvodů je požadován vysoký stupeň ochrany pracovníků při přípravě kyselinové lázně.[17][28]

V několika posledních letech výrazně nabývá na své významnosti vývoj vhodných náhrad za technologii tvrdého chromování. Snaha nahradit tvrdé chromování je způsobena stále rostoucími nároky na snižování emisních limitů šestimocného chromu, což může v konečném důsledku výrazně prodražit tuto stále ještě ve vysoké míře používanou technologii. Velice citelné snížení denní dávky šestimocného chromu, které může být obsluha vystavena je do budoucna plánováno např. v USA, a to z původních  $0,1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  na  $0,0005$  až  $0,005 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . [17]

## 5.3 GALVANICKÉ NIKLOVÁNÍ

Používá se pro vytváření ochranných povlaků na oceli, mědi, zinku a jiných slitinách. Bez mezivrstvy se galvanicky vytvořené niklové povlaky používají na ochranu chemických zařízení v alkalickém prostředí a také pro zvýšení odolnosti proti opotřebení.[3]

### 5.3.1 TECHNOLOGIE

Jako nejčastější způsob vytvoření niklové vrstvy se používá systému Cu-Ni-Cr. Na povrchu součásti vyloučená vrstva niklu je pokryta tenkou vrstvou chromu, který chrání nikl před atmosférickou korozí.[3]

Pro galvanické niklování se používá několik druhů elektrolytů [3]:

- síranové lázně (Wattsova lázeň),
- chloridové lázně,
- fluoroboritanové lázně,
- lázně pro speciální účely (nikl - seal, saténové niklování, disperzní niklové vrstvy, černé niklové povlaky).

Pro účely pokovování součástí spalovacích motorů se využívají disperzní niklové vrstvy, které se vylučují v síranových lázních s přídavkem mechanických nevodivých přísad.





Zdrojem kovu v těchto lázních je síran nikelnatý  $\text{NiSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  a jako vodící sůl se používá chlorid nikelnatý  $\text{NiCl}_2$ . Disperzní niklové vrstvy vznikají vylučováním mechanických nevodivých částic spolu s niklem. Jako nevodivé částice jsou používány např. karbidy, nitridy, boridy nebo diamant a vznikají systémy Ni-SiC, Ni-P-SiC, Ni-TiC, Ni-diamant apod. Vrstva tvořená Ni-SiC tzv. Nikasil se díky příměsi SiC vyznačuje vysokou tvrdostí a tvoří povlak s vynikajícími kluznými vlastnostmi. Při následujícím chromování způsobuje přítomnost nevodivých přísad v niklové vrstvě vytvoření mikroporézního chromového povlaku.[2][3]

### 5.3.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU

Jako příprava pokovované součásti před galvanickým niklováním se používá kombinace hrubého, katodického a anodického odmaštění. Následná tloušťka niklové vrstvy v systému Cu-Ni-Cr je závislá na agresivitě prostředí, kterému bude výsledný chráněný výrobek vystaven. Obvykle se tato tloušťka pohybuje v rozmezí 4 až 15  $\mu\text{m}$  s tloušťkou chromového povlaku 0,5  $\mu\text{m}$ . [3]

Síranové lázně pracují s proudovou hustotou 2 až 5  $\text{A}/\text{dm}^2$  při teplotě 50 až 70 °C. Výsledkem jsou jemnozrnné matné povlaky s malým vnitřním pnutím. Vylučování se provádí z niklových lázní, do kterých se přidává prášek karbidu v množství 20 až 50 g/l přičemž velikost přídavných částic bývá 2 až 16  $\mu\text{m}$ . Při galvanickém niklování se musí lázeň intenzivně míchat.[3]

### 5.3.3 DOKONČOVACÍ OPERACE

Po úpravě povrchu válce spalovacího motoru pomocí galvanického niklování se jako dokončovací operace používá honování. Vzhledem k vysoké tvrdosti vytvořených povlaků není možné používat běžné honovací kameny používané pro vložky válců motoru bez povrchové úpravy. Proto se používají speciální honovací kameny obsahující tvrdé částičky křemíku.[14]

Další speciální metoda honování používaná pro tento druh povrchových úprav je tzv. Flex Hone<sup>®</sup>. Jedná se o honování pomocí kartáče složeného z kamínků ve tvaru kuliček. Pro honování válců motoru s Nikasil povrchem se jako materiál těchto kuliček používá oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Tato metoda honování se používá také pro úplné odstranění nanesené vrstvy Nikasilu z povrchu válce pokud je před nanesením nové vrstvy při renovaci požadováno.[9]



*Obr. 7 Honování válců motoru metodou Flex Hone® [9]*

#### 5.3.4 APLIKACE

Galvanicky vytvořený niklový povlak na bázi Ni-SiC (Nikasil) se používá k úpravě pracovních ploch válců spalovacích motorů s quasi-monolytickými bloky. Vzhledem k možnosti nanášení relativně silných vrstev Ni-SiC povlaků (0,25 až 0,5 mm) je tato technologie používána také k renovaci opotřebovaných válců. Dále je galvanické niklování používáno pro povrchovou úpravu pístních kroužků a k povrchové úpravě součástí, u kterých je vyžadována zvýšená odolnost proti opotřebení.[3][5]

#### 5.4 KOMPOZITNÍ POVLAKY

Jak již bylo uvedeno, mechanické vlastnosti povlaků vytvořených galvanickým pokovením mohou být výrazně zlepšeny použitím jemných nevodivých částic, které se vylučují z elektrolytu do povlaku spolu s niklem nebo chromem. Vznikla tak nová generace galvanického pokovení s jemně dispergovanými částicemi – katodicky vylučovaných kompozitních povlaků ECC (Electrodeposited Composite Coatings).[7]

Mezi tyto povlaky se řadí již zmíněné povlaky s tvrdochromovou maticí CKS a GDC nebo povlaky s niklovou maticí (např. Nikasil).

Takto vzniklé povlaky mají výsledné mechanické vlastnosti závislé na odlišných vlastnostech dispergované fáze (extrémní tvrdost, kluzné vlastnosti) a vlastnostech kovové matrice (elektrická a tepelná vodivost, tažnost). Oproti klasickým galvanickým procesům je výhoda v širším využití, kterého lze dosáhnout kombinací široké palety dispergovaných částic s kovovými maticemi.[7]



### 5.4.1 DISPERZNÍ FÁZE

Nejčastěji používané disperzní částice jsou korund  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , karbid křemíku  $\text{SiC}$  nebo výjimečně diamant. Další alternativy jsou oxidy ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), karbidy ( $\text{TaC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), boridy nebo nitridy. Důležité vlastnosti dispergovaných fází jsou srovnány v Tab. 1.[7]

Tab. 1 Souhrn důležitých vlastností dispergované fáze [7]

pořadí	částice	hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	bod tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]	mikrotvrdost [kPa]
1	$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,93 – 4,02	1470 – 1710	20 – 24
2	$\text{SiC}$	3,21	2050	29 – 35
3	$\text{TiO}_2$	3,8 – 4,2	1640	12
4	$\text{SiO}_2$	2,2 – 2,6	1470 – 1710	20 – 24
5	$\text{ZrO}_2$	5,6 – 6,1	2700 – 3000	16
6	$\text{ZrC}$	6,8	3540	26
7	$\text{TiC}$	4,9	3140	18 – 32
8	$\text{TaC}$	14,6	3900	19
9	$\text{WC}$	15,8	2600 – 2800	24
10	$\text{TiB}_2$	4,5	2930	30,5 - 41

Jako nejvhodnější materiál disperzních fází při srovnání vlastností uvedených v Tab. 1 se jeví karborundum ( $\text{SiC}$ ). Protože má velmi nízkou hustotu, která je požadována pro stabilitu suspenze elektrolytu a velmi vysokou tvrdost.[7]

### 5.4.2 KOVOVÉ MATRICE

Kovová matrice má významný vliv na vlastnosti kompozitního povlaku. Měla by mít co nejméně pórů, nízké vnitřní pnutí a být dostatečně houževnatá.[7]

Zřejmě nejvíce používanou kovovou maticí pro kompozitní povlaky je díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem čistý nikl. Pro vylučování niklové matrice se v největší míře používají elektrolyty síranové a sulfamátové. Při použití síranové lázně je nutno počítat s nižší produktivitou a při současném neužití činidla snižujícího pnutí, vznikají povlaky s velkým makropnutím.[7]

Kromě niklu je možné katodické vylučování kovových maticí z kobaltu, chromu, slitinových maticí na bázi niklu (Ni-Fe) nebo na bázi kobaltu (Co-Fe).[7]



## 6 CHEMICKO-TEPELNÉ NANÁŠENÍ POVLAKŮ

Pod pojmem chemicko-tepelné zpracování se rozumí procesy, při kterých se upravovaný povrch difúzně sytí kovem nebo nekovem za zvýšené teploty a tím se mění jeho chemické složení a výsledné vlastnosti.[4]

### 6.1 NITRIDACE

Při nitridování dochází k sycení povrchu (obsahujícího prvky Fe, Al nebo Cr) dusíkem za působení tepla. Dusík následně s prvky obsaženými v základním materiálu reaguje a vytváří tak tvrdé nitridy, které způsobují výrazné zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy. Proces nitridování lze rozdělit do tří základních skupin [6]:

- nitridace v plynném prostředí,
- plazmová nitridace (iontová),
- nitridace v solných lázních.

Přičemž nejvíce používanou technologií pro povrchové úpravy součástí spalovacích motorů je plazmová nitridace, která bude následně více rozvedena.

#### 6.1.1 TECHNOLOGIE PLAZMOVÉ NITRIDACE

Proces plazmové nitridace je jako jiné metody nitridace podmíněn přítomností atomárního dusíku na povrchu součásti, který je schopen za zvýšených teplot prostupovat do mřížky základního materiálu a difundovat dále do oceli. Ovšem u plazmové nitridace není dusík získáván tepelným rozkladem nestabilních sloučenin, ale pomocí působení elektrického pole na molekulární dusík.[4]



*Obr. 8 Nitridace součástí v modro-fialovém anomálním výboji [20]*



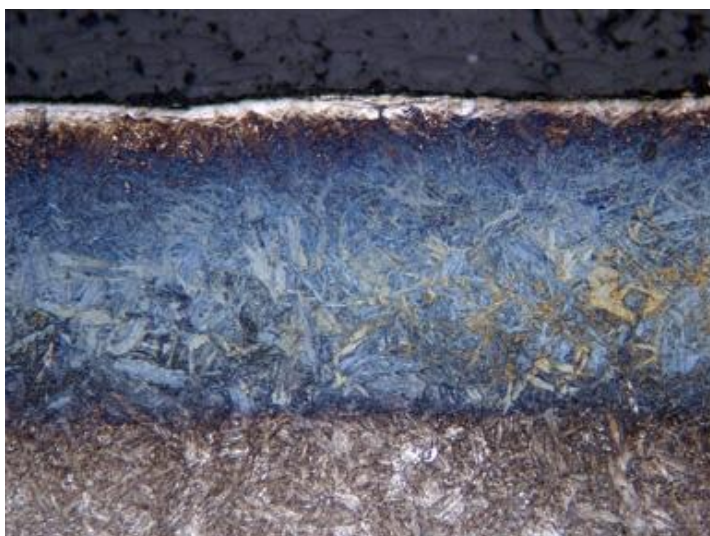
Jako zdroj dusíku v okolí nitridované součásti se používá směs plynů  $N_2$  a  $H_2$  nebo Ar. Ionizací a štěpení směsi plynů zajišťuje průtok elektrického proudu mezi povlakovanou součástí a stěnou nádoby, ve které dochází k nitridaci. Průtok elektrického proudu zapříčiní vznik elektrického pole v modrofialovém anomálním výboji. Vzniklé elektrické pole urychluje kladné ionty směrem k povrchu součástek. Při dopadu se část kinetické energie iontů dusíku přemění na teplo, čímž je součást ohřívána na teplotu 400 až 600 °C. Dalším jevem je vyražení atomů železa, uhlíku a dalších prvků z povrchu součásti způsobené vysokou kinetickou energií dopadajících iontů, jedná se o tzv. katodové odprašování. Při katodovém odprašování vznikají na dusík bohaté nitridy železa a uhlíku, které dále kondenzují na povrchu součásti a vytvářejí tak absorpční vrstvičku s velmi vysokým podílem dusíku. Tato vrstvička se dále rozpadá a část takto uvolněného dusíku difunduje do povrchu oceli a vazbou na nitridované prvky tvoří difuzní povrchovou nitridační vrstvu. Katodické odprašování vyráží z povrchu součásti také oxidy, což způsobuje značnou depasivaci povrchu a tím i zlepšení podmínek nitridování zejména u vysoce legovaných ocelí.[4]

### 6.1.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU PLAZMOVÉ NITRIDACE

Samotný proces plazmové nitridace probíhá ve vakuové nádobě (recipientu), která je zapojena jako anoda. Nitridované součásti jsou umístěny uvnitř vakuové nádoby izolovaně od jejích stěn a zapojeny jako katoda. Ve vakuové nádobě je udržován nízký tlak zředěné směsi plynů, kterou nejčastěji tvoří dusík a vodík ( $N_2 + H_2$ ) nebo Ar. Elektrické pole potřebné pro ionizaci a štěpení směsi plynů vzniká při připojení stejnosměrného proudu o napětí 400 až 1000 V na katodu a anodu.[4]

Během procesu nitridace vzniká na povrchu součásti nitridační vrstva, která se skládá z tzv. bílé vrstvy a difuzní vrstvy. Bílá vrstva vzniklá na povrchu povlakované součásti může být několik mikrometrů silná a je tvořena intermetalickou sloučeninou železa a dusíku. Její složení je možno výrazně ovlivnit složením nitridační atmosféry. První možností jak změnit složení bílé vrstvy je použití plynu neobsahující uhlík. Takto vzniklá bílá vrstva je tvořená nitridem železa  $Fe_4N$  s mřížkou krychlovou, plošně středěnou, je rovnoměrná a nejsou v ní přítomny póry. Dosahuje maximální tloušťky 8  $\mu m$  a její růst se zastavuje přibližně po šesti hodinách. Má vysokou tvrdost, odolnost proti opotřebení a dobré antikorozi vlastnosti. Druhou možností změny složení bílé vrstvy je přidání zhruba 0,5 % uhlíku do nitridační atmosféry. Vznikne tak další monofázová bílá vrstva tvořená nitridem železa  $Fe_{2-3}N$  s šesterečnou mřížkou, která neobsahuje póry. Její růst se nezastaví ani po padesáti hodinách a podle podmínek nitridace dosahuje tloušťky až 30  $\mu m$ . Tato vrstva má výborné antikorozi vlastnosti a odolnost proti zadírání. Třetí způsob je úplné vyloučení vzniku bílé vrstvičky čímž se dosahuje vzniku pouze difuzní vrstvy o tloušťce několik setin až desetin milimetru. Tento způsob nitridace se používá u součástí, u kterých je požadována vyšší mez únavy.[4]

Výhodou plazmové nitridace je, že součást je ohřívána na teploty potřebné pro nitridaci pouze vlivem přeměny části kinetické energie dopadajících iontů na teplo, čímž odpadá nutnost externího zdroje tepla a snižují se tak ekonomické náklady na nitridační proces. Vysoká hladina kinetické energie dopadajících iontů příznivě ovlivňuje také rychlost tvorby nitridační vrstvy, které je vyšší oproti jiným metodám nitridace.[4]



*Obr. 9 Struktura povrchu nitridované oceli [26]*

## 6.2 KARBONITRIDACE

Procesem karbonitridace je myšleno sycení povrchu směsí dusíku N s malým podílem uhlíku C. Tento proces má podobný charakter jako nitridace v solných lázních a je používán pro zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy a odolnosti proti opotřebení. Dělení karbonitridace lze provést na dvě technologie:

- tenifer,
- arcor.

Arcor oproti technologii tenifer produkuje vrstvy s menší pórovitostí. Do těchto procesů lze aplikovat postupy řízené kapalinové iontové karbonitridace CLIN (Controlled Liquid Ionic Nitrocarburizing).[11][15]

### 6.2.1 TECHNOLOGIE KARBONITRIDACE

Při procesu karbonitridace dochází k difuzi dusíku a uhlíku do povrchu základního materiálu, který musí mít železný charakter. Vytváří se tak sloučeninou vrstva, která má nekovový charakter. Mezi výhody se řadí fakt, že odolná vrstva nevzniká nanášením na povrch, ale vzniká na základním materiálu, což zvyšuje její přilnavost a snižuje citlivost k praskání. Jako zdroj dusíku se používají sodné a draselné kyanatany, které nejsou jedovaté. Na povrchu dílů se při chemické reakci přemění alkalický kyanatan na uhličitan. Tato reakce je doprovázena pomalou změnou složení solné lázně. Recyklace uhličitanu na aktivní kyanatan je docílena průběžným přidáváním nejedovatého polymerického organického regenerátoru.[11]





### 6.2.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU KARBONITRIDACE

Ještě před samotnou karbonitridací je nutné předběžné očištění a předehřátí na vzduchu na teplotu 350 až 400 °C. Poté se díly ponoří na 60 až 120 minut do solné lázně, kde se teplota pohybuje kolem 570 až 590 °C. Použití vyšších či nižších teplot je využíváno pouze ve speciálních případech. Pro chlazení se používá voda, vzduch, dusík, vakuum nebo oxidační chladicí lázeň. Použití oxidační chladicí lázně na rozdíl od ostatních způsobů chlazení podstatně zvyšuje odolnost proti korozi zpracovaných povrchů. Dále se zpracované díly čistí horkou vodou, k čemuž je využíváno kaskádové mycí zařízení. Na správný postup mají vliv tři parametry, které se musí během procesu karbonitridace sledovat: chemické složení solné lázně, teplota lázně a doba zpracování.[11]

Kompaktní sloučeninovou vrstvu je vidět již po několika minutách karbonitridace, přičemž za obvyklou dobu 60 až 120 minut vrstva dosahuje síly 10 až 20 µm. Tyto vrstvy dosahují velmi vysoké tvrdosti 800 až 1500 HV v závislosti na typu použitého materiálu, zaručují vysokou ochranu proti opotřebení, oděru, důlkové korozi a únavě.[11]

Protože karbonitridací vytvořené povlaky se svou kvalitou vyrovnají povlakům získaným pomocí galvanického chromování a navíc jsou vytvářeny moderními procesy, které jsou jednoduché a šetrné k životnímu prostředí. Představují tedy ideální alternativu právě ke galvanickému chromování.[11]

### 6.3 DOKONČOVACÍ OPERACE NITRIDACE A KARBONITRIDACE

Nitridované a karbonitridované povrchy se mimo jiné vyznačují také svou hladkostí a velmi malým nárůstem rozměrů nitridovaných součástí společně s rovnoměrným ohřevem součástí, který má minimální vliv na deformace. Tyto vlastnosti dovolují používání nitridovaných povrchů pro běžné strojírenské aplikace bez použití dokončovacích metod pro vylepšení kvality povrchu nebo pro odstranění rozměrových popř. geometrických změn po provedení nitridace. Pokud je ale dokončovací operace po nitridování požadována, musí být broušení a honování nitridovaných ploch prováděno technologiemi, které již byli popsány v kapitole 5.2.3 za pomoci superabrazivních materiálů.[4]

### 6.4 APLIKACE

Nitridované povrchy se díky své vysoké tvrdosti (>1100 HV) a z toho plynoucí vysoké odolnosti proti opotřebení používá jako povrchová úprava prvního popř. druhého pístního kroužku. Používá se jednak samotná nitridace pístních kroužků nebo jako náhrada tvrdého chromování pístních kroužků se používá nitridace podkladní vrstvy pod PVD povlaky na bázi CrN, čímž vznikají tzv. duplexní vrstvy. Nitridace se také používá jako povrchová úprava pracovních ploch vačkových a klikových hřídelí. V menší míře se nitridace využívá jako ochrana povrchu vložek válců spalovacích motorů.[4][25]

Karbonitridované povrchy se využívají zejména pro povrchovou úpravu dříků ventilů jako náhrady za povlaky vytvořené galvanickým chromováním. Lze takto snížit výrobní náklady vynecháním indukčního kalení a konečného broušení, které po karbonitridaci nemusí následovat. Z možnosti vynechání indukčního kalení vyplývá i úspora materiálu dříků ventilů. Může se použít žáruvzdorná austenitická ocel namísto oceli pro indukční kalení.[11]



## 7 TERMICKÉ NÁSTŘIKY (METALIZACE)

Různé způsoby termických nástřiků jsou tepelně mechanické procesy, které představují ideální způsob vytváření kovových i nekovových povlaků případně jejich kombinací na povrchu součástí. Natavenému přídavnému materiálu ve formě malých částic je dodána dostatečná kinetická energie, díky které je transportován na předem připravený povrch povlakované součásti, kde tvoří požadovaný povlak.[4]

Proces termického nástřiku v podstatě můžeme rozdělit do tří následujících fází [4]:

- vznik a následná stabilizace tepelného zdroje spolu s přívodem přídavného materiálu,
- natavení přídavného materiálu zdrojem tepla a dodání kinetické energie natavenému materiálu (část tepelné energie se přenáší do nataveného přídavného materiálu),
- ulpívání natavených částic přídavného materiálu na povrchu povlakované součásti, při kterém je kinetická a tepelná energie částic přenesena na součást.

Termické nástřiky je možné rozdělit podle mnoha hledisek. Nejčastěji se používá dělení podle zdroje použité tepelné energie na [4]:

- termický nástřik plamenem,
- termický nástřik detonací,
- termický nástřik elektrickým obloukem,
- termický nástřik plazmou.

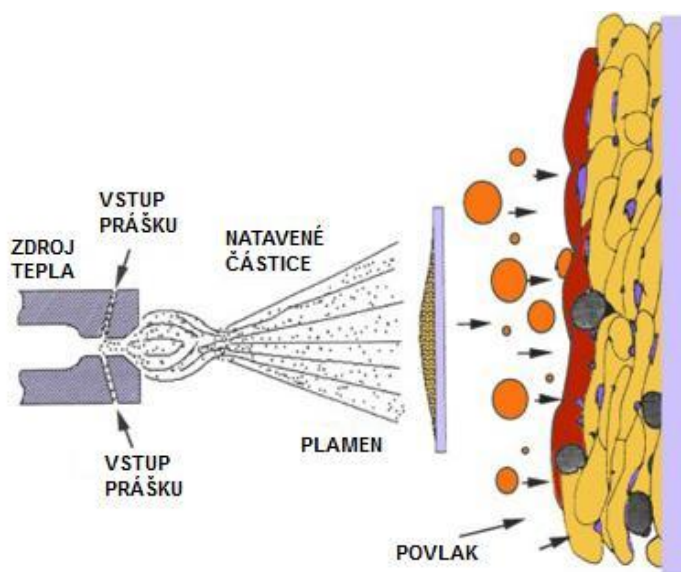
### 7.1 TECHNOLOGIE TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ

Na rozdíl od ostatních technologií nanášení povlaků, není technologie termických nástřiků založena na přemísťování jednotlivých atomů nebo iontů. Na povrch povlakované součásti jsou nanášeny celé částice nataveného nebo částečně nataveného přídavného materiálu. Přídavný materiál ve formě prášku, drátu nebo tyčinky je nataven zdrojem tepla a je urychlen směrem k povlakované součásti. Po dopadu natavené částice na povrch součásti dojde k jejímu výraznému plošnému rozproštění a následně k rychlému zatuhnutí. Tím je vytvářen povlak s charakteristickou laminární strukturou a specifickými vlastnostmi. Vysoká rychlost chladnutí částice na povrchu součásti má za následek krystalizaci velmi jemných zrn a zabraňuje vytváření rovnovážných fází. Strukturu povlaku tak narušují jen oxidy, které vznikají na povrchu horké částice při letu atmosférou. Vzniká tak velmi homogenní rozložení prvků v povlaku, které se blíží rozložení prvků v původním materiálu.[21]

Obrovskou výhodou termických nástřiků oproti jiným technologiím nanášení odolných povlaků je možnost nanášení povlaků z různých druhů keramik, kovů a jejich slitin, u kterých nedochází k rozpadu při teplotě pohybující se pod bodem tání těchto materiálů. Výsledný povlak je ke zdrsňenému povrchu součásti zakotven mechanicky, což umožňuje aplikovat termické nástřiky prakticky na všechny druhy materiálů. Další výhodou termických nástřiků je nízké teplotní ovlivnění povlakované součásti. Teplota v místě nástřiku se pohybuje okolo 80 až 120 °C, což je hluboko pod teplotou tavení součásti (zejména se jedná o bloky motorů



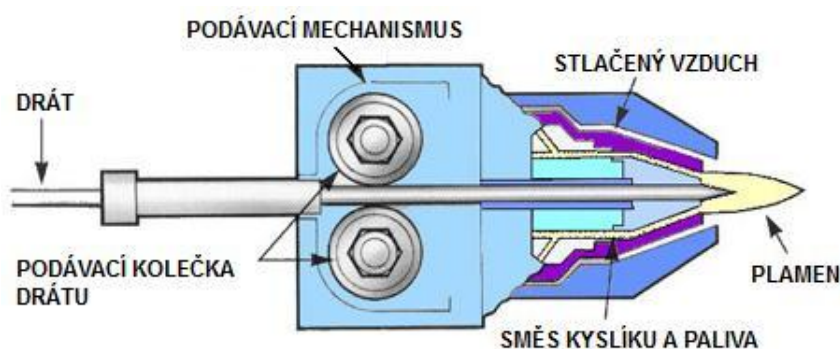
ze slitin Al-Si), zabraňuje se tak negativním materiálovým změnám základního materiálu. Nízká teplota v místě nástřiku předchází také nežádoucím deformacím součásti.[21]



Obr. 10 Schéma procesu vytváření žárových nástřiků [21]

### 7.1.1 TECHNOLOGIE TERMICKÉHO NÁSTŘIKU PLAMENEM

Jedná se o nejstarší technologii žárového nástřiku. Jako zdroj tepla pro natavení přídavného materiálu se používá stlačený kyslík nebo vzduch společně s palivem, kterým obvykle bývá acetylen, propylen, propan nebo vodík. Přídavný materiál je přidáván do plamene vzniklého hořením směsi plynů kde se taví a na povrch součásti je nanášen dynamickým účinkem plamene.[4][21]



Obr. 11 Schéma zařízení pro nástřik plamenem [21]

### 7.1.2 TECHNOLOGIE DETONAČNÍHO TERMICKÉHO NÁSTŘIKU

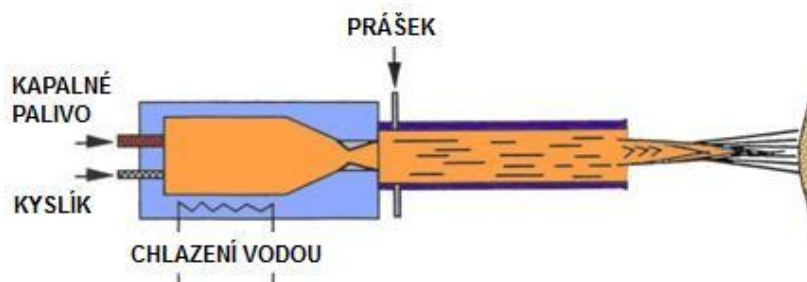
Termický nástřik detonací využívá kinetické a tepelné energie vznikající při spalovacím procesu plynů, které jsou uzavřeny ve spalovací komoře. Jako hořlavý plyn se většinou používá acetylen ( $C_2H_2$ ), který společně s kyslíkem tvoří hořlavou směs. Přídavný materiál je

u metody detonačního nástřiku přiváděn do spalovací komory ve formě prášku těsně před zapálením směsi plynů. K zapalování směsi se používá elektrický výboj zapalovací svíčky. Při explozi směsi plynů vzniká teplo, které natavuje přídavný materiál přibližně na teplotu 3500 °C. Dostatečnou kinetickou energii získávají natavené částice přídavného materiálu působením detonační vlny plynů vystupujících z trubice. Rychlost dopadu částic na upravovaný povrch je až 800 m·s<sup>-1</sup>. Poté je spalovací komora vypláchnuta proudem dusíku. Celý tento proces je cyklicky opakován s frekvencí 3 až 5 cyklů za sekundu.[4][21]

### 7.1.3 TECHNOLOGIE HVOF NÁSTŘIKU

HVOF nástřiky se z technologií termických nástřiků jeví jako nejvhodnější náhrada ekologicky závadného tvrdého chromování.

Vysokorychlostní nástřik plamenem je ve své podstatě podobný detonačnímu nástřiku. Rozdíl je v tom, že u HVOF nástřiku proces plnění spalovací komory přídavným materiálem a hoření plynů probíhá nepřerušovaně. Ve speciálně navržené konvergentně divergentní trysce dochází k hoření směsi kyslíku a paliva (kerosin, propylen, propan, acetylen, vodík atd.), spaliny jsou v trysce urychlovány až na supersonické rychlosti (Mach 1 až 2). Přídavný materiál ve formě prášku je za pomoci nosného plynu kontinuálně přiváděn do supersonického plamene, kde dochází k jeho natavení a výraznému urychlení směrem k povlakované součásti.[21]



Obr. 12 Schéma zařízení pro HVOF nástřik [21]

Významným parametrem pro HVOF nástřik představuje tzv. ekvivalentní poměr, který definuje stechiometrii plamene. Pokud je jako zdroj tepelné energie použita směs kyslíku a kerosinu, má vztah pro ekvivalentní poměr následující tvar [21]:

$$\Phi = \frac{\frac{F}{O}}{\left(\frac{F}{O}\right)_{st}} \quad (11)$$

kde:  $\frac{F}{O}$  je hmotnostní poměr kerosinu a kyslíku použitý pro nástřik

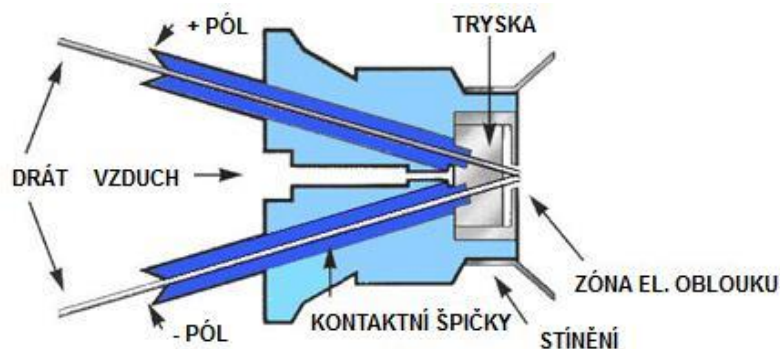
$\left(\frac{F}{O}\right)_{st}$  je stechiometrický poměr  $\frac{2057 l(O_2)}{1 l(ker)}$  určený z rovnice chemické reakce hoření kyslíku a kerosinu:



Přímý vliv na teplotu a rychlost částic prášku, tedy i na výsledné vlastnosti povlaku, mají tlak ve spalovací komoře a ekvivalentní poměr. Teplota částic nataveného přídavného materiálu je přímo úměrná teplotě plamene, která závisí na ekvivalentním poměru a zároveň není ovlivňována celkovým průtokem směsi plynů (tj. tlakem ve spalovací komoře). Rychlost natavených částic prášku je přímo úměrná hybnostnímu toku, který je závislý na celkovém průtoku směsi plynů a zároveň není závislý na relativním poměru složek směsi plynů. Teplotu a rychlost částic prášku je tedy možné ovlivnit pouze pomocí změn průtoků jednotlivých složek směsi plynů. Tyto poznatky jsou základem pro optimalizaci procesů nanášení jednotlivých povlaků metodou HVOF.[21]

#### 7.1.4 TECHNOLOGIE TERMICKÉHO NÁSTŘIKU ELEKTRICKÝM OBLOUKEM

Zdrojem tepelné energie pro natavení částic je u této technologie elektrický oblouk, který hoří mezi dvěma dráty z přídavného materiálu. Kinetická energie je na natavené částice přenesena z proudu stlačeného plynu (nejčastěji vzduchu).[4]



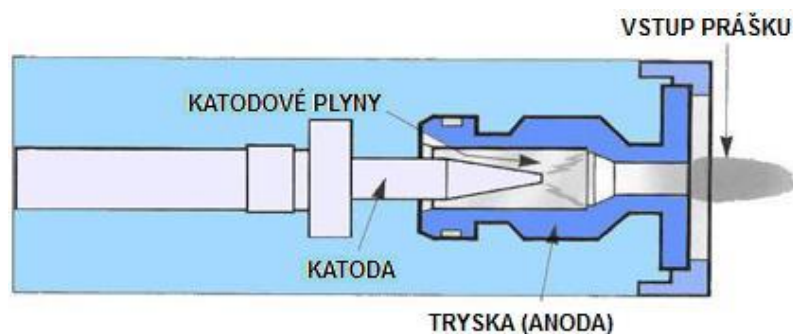
Obr. 13 Vedení drátu v zařízení pro nástřik elektrickým obloukem [21]

#### 7.1.5 TECHNOLOGIE TERMICKÉHO NÁSTŘIKU PLAZMOU

Zdrojem tepla potřebného pro natavení částic přídavného materiálu je při plazmatickém nástřiku elektrický oblouk hořící mezi wolframovou katodou a měděnou anodu, která zároveň tvoří i výstupní trysku. Elektrický oblouk hoří ve směsi plazmového plynu, který je tvořen inertním plynem (obvykle argonem) a několikaprocentní příměsí plynu zvyšujícího entalpii plazmatu např.  $H_2$ ,  $N_2$  nebo  $He$ . Směs plazmových plynů je do hořáku přivedena axiálně zezadu a na druhém konci vystupuje z trysky plazma s vysokou teplotou (až 20000 °C)



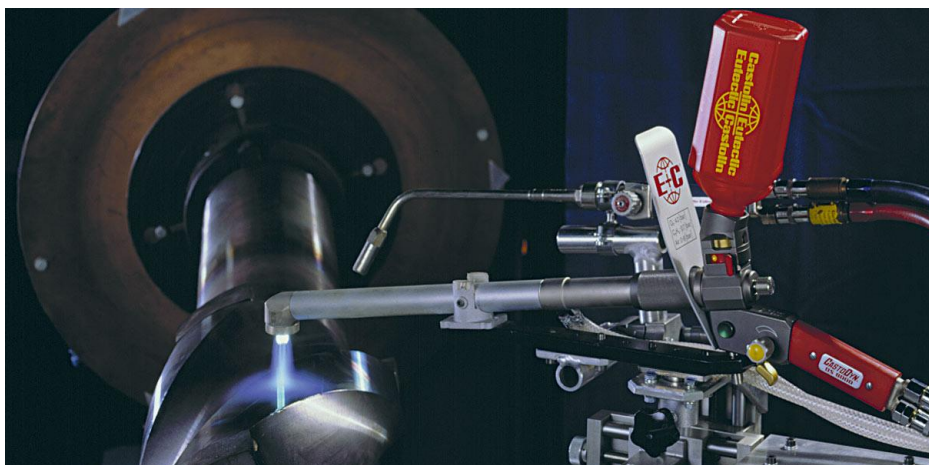
a entalpií. Do plazmatického plamene je přídavný materiál ve formě prášku přiváděn pomocí nosného plynu.[21]



Obr. 14 Schéma zařízení pro plazmatický nástřik [21]

## 7.2 CHARAKTERISTIKY TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ

Přídavné materiály mohou být kovové nebo keramické a to ve formě prášků, drátů nebo tyčinek. Nanášení vrstvy přídavného materiálu na součást lze aplikovat buď strojním způsobem, nebo ručně. Strojní nanášení je výhodné zejména u rotačních součástí. Součást, na kterou má být nanesen povlak se upne do rotačního manipulátoru nebo do soustruhu za pomoci různých polohovadel a tryskací pistole je připevněna k robotické ruce nebo na podélný suport, který se rovnoměrnou rychlostí pohybuje ve směru osy součásti.[21]



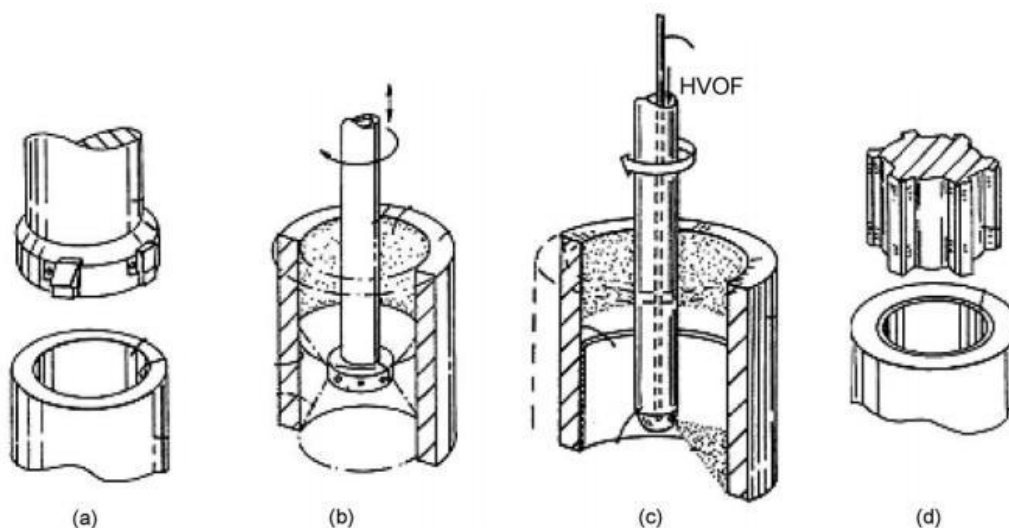
Obr. 15 Způsob nanášení povlaku na rotační součást [35]

Ještě před samotným termickým nástřikem je potřeba upravovaný povrch dokonale očistit a zdrsnit (aktivovat). Běžně se pro aktivaci používá otryskání povrchu pevnými částicemi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Otryskání pevným materiálem má ovšem nevýhodu v ulpívání pevných částic na povrchu. Tuto nevýhodu je možné odstranit použitím vodního paprsku nebo laserových technologií. Vodní paprsek i laserové technologie jsou ovšem pořád ještě ve vývoji a k jejich reálnému využití by bylo potřeba snížení ceny.[10]

Dalšími důležitými parametry významně ovlivňujícími kvalitu výsledného povlaku jsou teplota a rychlost plamene popř. nosného plynu. Tyto parametry určují, zda je k dispozici dostatek energie a času na natavení přídavného materiálu. Rychlost plamene má vliv na dobu setrvání částice v plameni a na její rychlost. Při použití vyšších rychlostí plamene je na částice přenášena větší kinetická energie, což má za následek větší plastickou deformaci částic při nárazu na povrch povlakované součásti, jejich lepšímu zakotvení a vyšší hustotě povlaku. Na druhou stranu při použití vyšší rychlosti plamene se zkracuje doba, kterou setrvávají částice v plameni, což může vést k nižšímu protavení částic, způsobující nižší hustotu povlaku a ke zvýšenému výskytu částečně natavených nebo nenatavených částic v povlaku. Nižší teplota částic přídavného materiálu má kladný vliv na míru jejich oxidace a dekarbonizace.[21]

U termických nástřiků elektrickým obloukem dochází na rozdíl od nástřiků plamenem a plazmou k tomu, že roztavená částice se začne ochlazovat okamžitě po svém natavení a oddělení od původního drátu. Horká částice reaguje v průběhu letu s okolním prostředím a následkem těchto reakcí je zvýšený výskyt oxidů ve výsledné struktuře povlaku.[21]

Na Obr. 16 je schematicky znázorněna výroba válce motoru od vrtání, přes povrchové úpravy, až po dokončovací operace.



Obr. 16 Schematické zobrazení procesu výroby a dokončovacích operací válce spalovacího motoru: a) vrtání válce, b) čištění povrchu válce a jeho zdrsnění pomocí vodního paprsku, c) termický nástřik povlaku metodou HVOF, d) dokončovací honování na konečný rozměr [16]

### 7.2.1 CHARAKTERISTIKA NÁSTŘIKU PLAMENEM

Povlaky vytvořené touto technologií obvykle nejsou využívány pro náročné aplikace, protože se vyznačují nízkými hodnotami hustoty a přilnavosti k základnímu materiálu. Hlavním důvodem těchto nedostatků je nízká dopadová rychlost částic  $50$  až  $80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a nízká teplota plamene kolem  $3800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplota natavených částic se pohybuje kolem  $2500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Navíc kovové povlaky obsahují často zoxidované částice, které zvyšují tvrdost povlaku, ovšem zároveň zvyšují i jeho křehkost, což je v mnoha aplikacích nežádoucí. Typickými materiály pro nástřik plamenem jsou kovy s nízkou teplotou tavení (hliník, zinek atd.). Při





použití přídavného proudu ochranného plynu lze zvýšit teplotu plamene tak, že umožňuje nástřik materiálů se střední teplotou tavení (ocel, NiCrBSi, Mo i některé druhy oxidů).[21]

### 7.2.2 CHARAKTERISTIKA DETONAČNÍHO NÁSTŘIKU

Vysoká teplota natavených částic umožňuje u detonačního nástřiku použití těžce tavitelných materiálů jako přídavného materiálu, jedná se například o některé druhy cermetů. Povlaky zhotovené touto metodou se vyznačují velkou hustotou s pórovitostí pod 2 % a vysokou přilnavostí. Ve srovnání s nástřikem pomocí plamenu má povlak vytvořený detonačním nástřikem výraznější rozprostření částic, snížený obsah zoxidovaných částic ve struktuře díky redukci oxidační atmosféry ve spalovací komoře a sníženou porezitu.[4][21]

Nevýhodou této technologie je nežádoucí produkce hluku, který dosahuje hodnoty až 140 dB. Takto vysoký hluk si vyžaduje hlukově izolované pracoviště pokud možno bez přítomnosti obsluhy. Snížení zvukových emisí lze dosáhnout použitím metody FARE GUN. Tato metoda pracuje s tzv. taktovacím způsobem v dvoukomorovém systému a používá dodatečné spalování směsí vysokomolekulárních plynů s kyslíkem. Krátkým uzavřením trysky se dosahuje navýšení tlaku plynů v komoře pro dodatečné spalování. Přídavný materiál je dodáván do spalovací komory ve formě kapslí zatavených v polyetylenové fólii.[4]

### 7.2.3 CHARAKTERISTIKA NÁSTŘIKU HVOF

U nástřiku metodou HVOF dochází vlivem vysoké dopadové rychlosti natavených částic ( $200 \text{ až } 1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) k jejich dokonalému rozprostření a zakotvení na povrchu povlakované součásti. Díky tomu se HVOF stříkané povlaky vyznačují velmi vysokou hustotou až 95 % a vysokou přilnavostí. Tato technologie má v porovnání s plazmatickým nástřikem poměrně nízkou teplotu plamene přibližně  $3300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , což se projevuje při nástřiku keramických povlaků, kdy dochází pouze k částečnému natavení částic a tím pádem není rozprostření částic na povrchu součásti ideální. Výhodou nižší teploty natavených částic ovšem je, že tolik nedochází k jejich oxidaci, jejich fázovým přeměnám a k vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Při volbě vhodných depozičních parametrů poskytuje HVOF nástřik povlaky v tlakovém pnutí, což umožňuje vytvářet povlaky velkých tloušťek. Povlaky s tlakovým pnutím také pozitivně ovlivňují únavové vlastnosti povlakovaných součástí.[21]

Jako přídavné materiály pro HVOF nástřik se používají kovy a jejich slitiny s nízkou a střední teplotou tání. Nejčastějším materiálem pro vysokorychlostní nástřik plamenem jsou cermety na bázi karbidů chromu, wolframu a titanu. V porovnání s plazmatickým nástřikem nedochází u HVOF nástřiku WC/Co povlaků k rozpadu WC fáze, čímž zůstávají zachovány původní vlastnosti materiálu (hlavně se jedná o tvrdost).[21]

### 7.2.4 CHARAKTERISTIKA TERMICKÉHO NÁSTŘIKU ELEKTRICKÝM OBLOUKEM

Hlavními přednostmi nástřiku elektrickým obloukem jsou zejména jednoduchost zařízení, nízké provozní náklady, vysoký výkon (až  $80 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ) a mobilita (pro provoz je potřeba pouze stlačený vzduch a elektrická energie). Další výhodou oproti ostatním metodám

žárových nástřiků je, že teplotní ovlivnění povlakované součásti je způsobené pouze teplem přivedeným na povrch roztavenými kapičkami kovu.[21]

Teplota elektrického oblouku kolem 5000 °C je dostatečně vysoká na roztavení mnoha druhů přídavných materiálů. Avšak velice limitujícími faktory výběru přídavných materiálů je omezení z hlediska jejich elektrické vodivosti a možnosti jejich výroby ve formě drátu. Tato omezení zužují výběr přídavných materiálů pro nástřik elektrickým obloukem zejména na kovy. V současné době jsou vyvíjeny tzv. trubičkové dráty, které by umožnily i nástřik cermetů.[21]

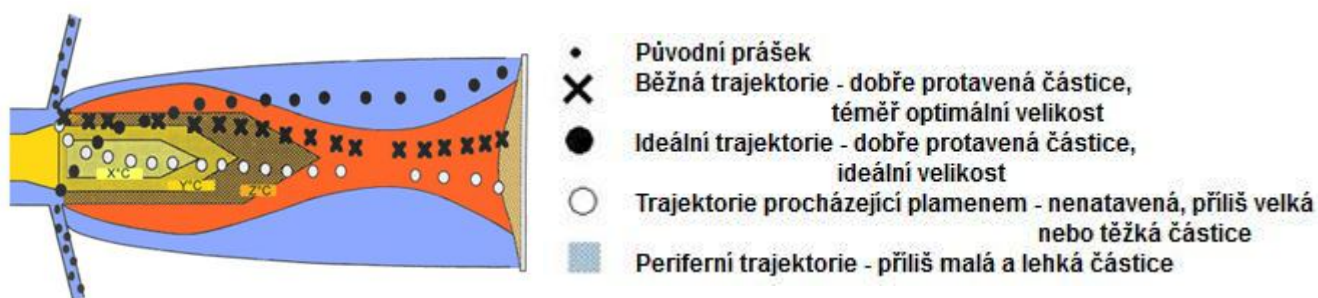
Ztuhlé rozprostřené částice na povrchu součásti nanesené elektrickým obloukem jsou v porovnání s jinými metodami termických nástřiků silnější a jejich velikost je nepravidelná, což má za následek vysokou míru pórovitosti ve struktuře povlaku (až 20 %), vyšší drsnost povrchu povlaku a poměrně vysoký obsah zoxidovaných částic ve struktuře povlaku. Kvalita výsledného povlaku je také silně závislá na stabilitě zdroje elektrického oblouku a plynulosti podávání drátů.[21]

### 7.2.5 CHARAKTERISTIKA TERMICKÉHO NÁSTŘIKU PLAZMOU

Pomocí plazmatického nástřiku je možné díky vysoké teplotě plazmatu nanášet v podstatě všechny druhy materiálů i těžce tavitelné materiály. Tato technologie je vhodná pro nástřik kovů, většiny keramik a cermetů. Vysoká teplota může být ovšem i nevýhoda protože někdy způsobuje nežádoucí oxidaci natavených částic přídavného materiálu, fázové změny v jejich struktuře nebo vyhořívání některých prvků v průběhu nástřiku. Vysokou hustotu, přilnavost a čistotu povlaku je možné dosáhnout aplikováním plazmatického nástřiku v uzavřené komoře za sníženého tlaku obvykle 0,005 až 0,02 MPa. Tyto metody se nazývají VPS (Vacuum Plasma Spraying) nebo LPPS (Low Pressure Plasma Spraying).[21]

Existuje mnoho konstrukcí zařízení pro plazmatický nástřik, které se mohou lišit zejména tvarem, velikostí elektrody, použitými materiály či způsobem chlazení. Díky rozdílům v konstrukci je rozsah charakteristik procesu velice široký.[21]

Konstrukce hořáku, jeho energetický příkon a použitý plyn ovlivňují především teplotu a rychlost proudu plazmatu. Výsledná rychlost natavených částic dopadajících na povlakovanou součást je dána rychlostí nosného plynu. Rychlost částice prášku společně s její hmotností a úhlem, pod kterým vstupuje do plazmatu, určuje výslednou trajektorii částic v proudu plazmatu. Možné trajektorie částic prášku v proudu plazmatu jsou schematicky znázorněny na Obr. 17.[21]



Obr. 17 Zobrazení možných trajektorií letících částic prášku [21]



Díky vysoké rychlosti dopadajících částic a jejich vysoké teplotě vznikají na povrchu součásti povlaky, které se vyznačují velmi jemnou, hustou strukturou a vysokou přilnavostí. Hustota povlaku se obvykle pohybuje od 95 do 99 %. Při nástřiku technologií VPS nebo u nástřiku v komoře s inertním plynem je obsah zoxidovaných částic zcela eliminován. U atmosférického nástřiku mohou natavené částice reagovat s plyny v atmosféře a vytvářejí se tak oxidické vměstky ve struktuře povlaku. Pro snížení obsahu zoxidovaných částic v povlaku se kromě již zmíněné VPS technologie používá také plazmatický nástřik v řízené atmosféře, plazmatický nástřik se stíněním (shrouded) nebo podvodní plazmatický nástřik (UPS).[21]

### 7.3 DOKONČOVACÍ OPERACE TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ

Mezi dokončovací operace, které následují po nanesení povlaku pomocí termického nástřiku, patří honování vnitřních ploch válců motoru. Vzhledem k poměrně velké drsnosti povrchu vytvořených povlaků se používá honování rozdělené do tří kroků. První krok je honování sloužící k odstranění a vyrovnání hrubých nerovností prováděno pomocí honovacích kamenů s hrubou zrnitostí. V druhém kroku je dále vylepšován válcový tvar a válec je obroben zhruba na požadovaný průměr s malým přídavkem na dokončení, které se provádí ve třetím kroku pomocí honovacích kamenů s jemnou zrnitostí a dodává povrchu požadované vlastnosti. Výsledný povrch je charakteristický tím, že se v drážkách vznikajících při procesu honování zadržuje olej a snižuje se tak tření mezi válcem motoru a pístním kroužkem. Tloušťka vrstvy po honování je obvykle 100 až 150  $\mu\text{m}$ . Pro konečnou úpravu pístních kroužků, na které je nanесena funkční vrstva pomocí termického nástřiku se obvykle používá lapování nebo broušení na speciálních bruskách. Metoda třístupňového honování je vhodná zejména pro povlaky nanесené termickými nástřiky je možné jí ovšem použít i pro dokončení povrchů nanесených jinými technologiemi povrchových úprav.[19]

### 7.4 APLIKACE TERMICKÝCH NÁSTŘIKŮ

Termický nástřik plazmou se používá pro povrchovou úpravu válců spalovacích motorů, kdy je na povrch válce plazmaticky nanášena kovokeramická vrstva např. slitiny hliníku obsahující keramické částičky (např.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Další velice častou aplikací termických nástřiků je úprava povrchu prvního pístního kroužku zejména u dieselových motorů. Na hlavní třecí plochu pístního kroužku je obvykle nanесena odolná vrstva pomocí plazmového nástřiku, nástřiku plamenem nebo pomocí HVOF nástřiku. U plazmatického nástřiku a nástřiku plamenem se nejčastěji jedná o vytváření tenké vrstvy molybdenu. V případě plazmatického nástřiku lze aplikovat i materiály keramické nebo kovokeramické. Metodou HVOF jsou na namáhané pístní kroužky nanášeny materiály na bázi karbidů CrC-NiCr pro teploty 800 až 900  $^{\circ}\text{C}$  nebo WC-Co pro teploty 450 až 530  $^{\circ}\text{C}$ , které mají vysokou otěruvzdornost a výborné třecí vlastnosti a jsou srovnatelné s povlaky vytvořenými technologií tvrdého chromování.[5][32]





## 8 FYZIKÁLNÍ METODY NANÁŠENÍ POVLAKŮ VE VAKUU (PVD)

Základním principem nanášení povlaků ve vakuu pomocí fyzikálních metod je převedení pevného kovu (např. titan) do plynného stavu a jeho následná kondenzace na povlakované součásti. Podle způsobu převedení pevného kovu do plynného stavu rozlišujeme metody PVD (Physical Vapor Deposition) do tří základních skupin [4]:

- vakuové napařování (evaporation),
- vakuové naprašování (sputtering),
- iontové plátování (ion plating).

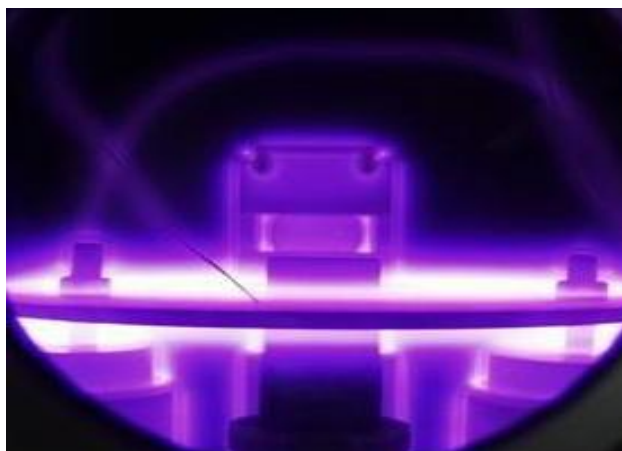
Při nanášení otěruvzdorných a tvrdých povlaků na součásti spalovacích motorů hraje největší roli vakuové naprašování, kterému se následně budeme věnovat.

### 8.1 TECHNOLOGIE VAKUOVÉHO NAPRAŠOVÁNÍ

Vakuové naprašování lze rozdělit do dvou metod [4]:

- katodové,
- magnetronové.

Při použití metody vakuového katodového naprašování je ve vakuové komoře po celou dobu procesu udržován nízký tlak 0,1 až 1 Pa. Do komory je napouštěn inertní plyn (nejčastěji argon) a následně dochází k jeho ionizaci v doutnavém výboji (Obr. 18). Vytvořené kladné ionty pracovního plynu narážejí do povrchu kovové katody a vyrážejí odtud částice, které se následně usazují na povrchu povlakované součásti a vytvářejí tak požadovaný povlak. Pokud je do vakuové komory současně s inertním plynem přiveden i reaktivní plyn, jedná se o tzv. reaktivní naprašování. Reaktivní plyn reaguje s rozprášeným kovem a vznikají chemické sloučeniny, které se dále usazují na nanášeném povlaku. Jako reaktivní plyn může být použit např. dusík. Částice kovu mají při dopadu na povlakovaný povrch energii 5 až 10 eV.[4]



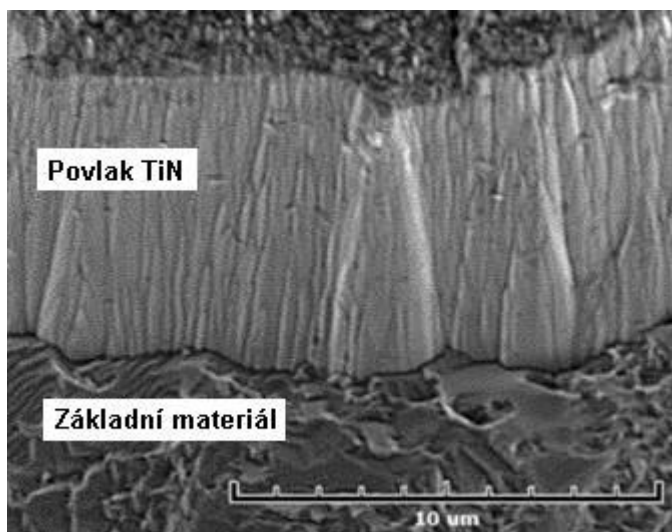
*Obr. 18 Ionizace inertního plynu během procesu naprašování [27]*



Magnetronová metoda vakuového naprašování spočívá ve zvýšení počtu částic, které jsou vyraženy kladnými ionty pracovního plynu. Tohoto navýšení se docílí aktivací procesu katodového naprašování, která spočívá ve vyvolání magnetického pole o intenzitě  $\mathbf{B}$ , jejíž vektor je kolmý na vektor  $\mathbf{E}$  intenzity elektrického pole. Tím je docíleno, že elektrony vyzářené z katody se pohybují po složitějších a delších drahách a dochází tak k ionizaci více atomů pracovního plynu, čímž stoupá účinnost odprašování.[4]

## 8.2 CHARAKTERISTIKA VAKUOVÉHO NAPRAŠOVÁNÍ

Naprašované součásti musí mít kovově čistý povrch pro dosažení co nejlepší adheze. Poté jsou umístěny do vakuové komory, připevněny do držáku a následně vystaveny proudu rozprášeného přidavného materiálu. Před samotným naprašováním musí být povlakované součásti předehřáty na určitou teplotu. Jako iontový zdroj se používá nízkonapěťový oblouk nebo magnetrony, u kterých jsou rozdílné energie částic a podíly iontů. Složení fází povlaku je závislé na poměru iontů plynu a přidavného materiálu. Touto technologií je možné připravovat povlaky, které obsahují více složek různých kovů nebo povlaky s proměnným obsahem různých prvků.[4]



Obr. 19 Struktura vrstvy TiN vytvořené technologií PVD [12]

Výsledný povlak vzniká usměrněným růstem zrn, má heterogenní strukturu a vznikají v něm pnutí, která mohou být tahová i tlaková v závislosti na technologických podmínkách nanášení povlaku.[4]

U magnetronového naprašování dochází k většímu počtu srážek částic. Díky tomu se šíří různými směry a povlak je nanášen i na odvrácené strany povlakované součásti. Dochází tak k rovnoměrnějšímu pokrytí povlakem i na hranách a šikmých plochách.[4]

Technologie vakuového naprašování je používána pro vytváření tzv. DLC (Diamond Like Carbon) povlaků, které jsou tvořeny především grafitickým uhlíkem, diamantovým



uhlíkem a vodíkem v různých podílech v závislosti na konkrétním procesu. Výsledné mechanické a chemické vlastnosti této amorfni vrstvy jsou závislé na podílu složek, ze kterých je tvořena. DLC povlaky nanášené zejména technologií PVD a PECVD se vyznačují vysokou tvrdostí a velmi nízkou hodnotou součinitele tření i v mezním mazacím režimu.[24]

V zásadě jsou dvě hlavní skupiny DLC povlaků [24]:

- bezvodíkové povlaky (ta-C, a-C),
- hydrogenové povlaky (a-C:H).

Největším problémem při nanášení DLC povlaků je získání dostatečně pevné styčné vazby. Odstranění tohoto problému se u oceli dosahuje nanesením podkladových vrstev na bázi titanu, wolframu, chromu nebo křemíku.[24]

### 8.3 DOKONČOVACÍ OPERACE

Vzhledem k velmi vysoké tvrdosti povlaků nanesených technologií PVD lze předpokládat, že pro dokončovací operace prováděné broušením je zapotřebí brusných kotoučů obsahujících velmi tvrdé nebo superabrazivní materiály (karbid křemíku SiC, syntetický diamant D nebo kubický nitrid boru CBN) stejně tak jak je tomu u všech dříve popsaných dokončovacích povrchových úprav s výjimkou fosfátování.

### 8.4 APLIKACE

Díky svým vlastnostem jsou DLC povlaky nanášené technologií PVD aplikovány na pístní kroužky a písty. Vícevrstvé povlaky pístních kroužků jsou obvykle na bázi nitridu chromu CrN, karbidu wolframu WC/C, karbidu titanu TiC atd. Příkladem aplikace DLC povlaků jsou pístní kroužky a písty u tříválcového motoru Kia Kappa, kde ochranná vrstva pístu je na bázi sulfidu molybdenyčitého MoS<sub>2</sub> a na pístní kroužky je nanesena vrstva nitridu chromu CrN. Ovšem uplatnění nacházejí DLC povlaky také na součástkách moderních vysokotlakých systémů vstřikování nafty.[33][34]



## ZÁVĚR

Povrchové úpravy jsou dnes již nedílnou součástí každého spalovacího motoru, pomáhají splňovat stále se zvyšující nároky kladené zejména na životnost, spolehlivost, spotřebu a v neposlední řadě na plnění emisních limitů spalovacích motorů.

Výsledkem této práce je dle zadání shrnutí nejpoužívanějších povrchových úprav, které je možné najít na součástech spalovacích motorů. Tato práce rozděluje metody povrchových úprav podle aplikovaných základních fyzikálních a chemických procesů a stručně přibližuje čtenáři jejich technologie a vlastnosti.

Prvním krokem dle zadání bylo analyzovat konstrukci spalovacího motoru, jeho funkčních podsoustav a provést rozbor za účelem lokalizace povrchovaných součástí. Jako nejvíce teplotně i mechanicky namáhané součásti se jeví díly klikového mechanismu, válce motoru a díly rozvodového ústrojí, u kterých jsou také odolné povlaky nanášeny nejčastěji. Dále jsou lehce zmíněny výrobní technologie odlévání bloků spalovacích motorů. Toto rozdělení je zde uvedeno za účelem objasnění čtenáři, na který druh bloků je vhodné nanášet odolné povlaky.

U každé povrchové úpravy je popsána technologie výroby, charakteristika procesu, dokončovací operace, které obvykle následují po dané povrchové úpravě a její aplikace v oblasti spalovacích motorů.

Přestože technologie povrchových úprav jsou dnes již dost propracované a na vysoké úrovni, jejich vývoji se stále věnuje velké množství společností a organizací. Hlavním důvodem dalšího vývoje je nesporný potenciál, který skrývají zejména kompozitní povlaky a termické nástřiky (zejména pak plasmatické nástřiky a HVOF). Dalším důvodem výzkumu v tomto oboru je bezesporu snaha najít adekvátní alternativy za zdravotně závadné a prostředí škodlivé galvanické chromování.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] GSCHEIDLE, Rolf, a kol. *Příručka pro automechanika*. 2. doplněné vydání. Praha: Sobotáles, 2002. ISBN 80-85920-83-2
- [2] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 216 s. ISBN 80-7082-668-1
- [3] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB, 1995, 151 s. ISBN 80-7078-267-6
- [4] PODJUKLOVÁ, J. Speciální technologie povrchových úprav I. 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava, 1994. 76s. ISBN 80-7078-235-8
- [5] RAUSCHER, J. *Vozidlové motory* [studijní opora ve formátu PDF]. FSI VUT v Brně, 2003
- [6] TOTTEN, E. G. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Techniques: Nitriding Techniques* [online]. 2. vyd. New York: CRC Press, 2006 [cit. 2012-04-07]. ISBN 0-8493-8452-4
- [7] ADAMIŠ, P. a MOHYLA, M. *VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH POVLAKŮ S KATODICKÝ VYLUČOVANOU MATRICÍ* [online]. Ostrava - Poruba: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2000 [cit. 2012-05-16]. Metal 2011. Dostupné z: <http://www.metal2011.com/data/metal2000/sbornik/papers/653.pdf>
- [8] Aluminium engine blocks and NIKASIL coating: LOKASIL cylinder slinding surfaces. Dr. Golfmann [online]. 21. 3. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=dkleed&logNo=40154974384&parentCategoryNo=&categoryNo=&viewDate=&isShowPopularPosts=false&from=postView>
- [9] Automotive: Flex-Hone® Applications. Brush Research Manufacturing [online]. 2012 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <http://www.brushresearch.com/automotive-industry.php>
- [10] BARBEZAT, G. THE STATE OF THE ART OF THE INTERNAL PLASMA SPRAYING ON CYLINDER BORE IN AISi CAST ALLOYS. *International Journal of Automotive Technology* [online]. 2001, č. 2, s. 42-57 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: [http://society.kisti.re.kr/~Eksae/\\_notes/data/pdf/v2n2\\_2.pdf](http://society.kisti.re.kr/~Eksae/_notes/data/pdf/v2n2_2.pdf)
- [11] BOBLET, J. a GERSTENBERGER, J.. Řízená kapalinová iontová karbonitridace. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 23. 4. 2008, č. 4 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rizena-kapalinova-iontova-karbonitridace.html>
- [12] Coatings: PVD (physical vapor deposition) hard coatings. *Institute of materials & Machine Mechanics: Slovak academy of sciences* [online]. 2006 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.umms.sav.sk/index.php?ID=409>



- [13] Corrosion protection: Environmental friendly surface pre-treatment of aluminium. *SINTEF: Materials and Chemistry* [online]. 2005 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.sintef.no/home/Materials-and-Chemistry/Synthesis-and-Properties/Surfaces-and-Thin-Films/Corrosion-protection/>
- [14] DEMPSEY, W. R. *How to Rebuild and Modify Porsche 911 Engines 1966-1989* [online]. MotorBooks International, 2003 [cit. 2012-04-16]. ISBN 0-7603-1087-4. Dostupné z: [http://books.google.cz/books?id=ogRFgBZMYvsC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=ogRFgBZMYvsC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [15] Durferrit. *Karbonitridace* [online]. 20. 5. 2008 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.hef-durferrit.cz/karbonitridace.htm>
- [16] EDRISY, A., T. PERRY a A. T. ALPAS. Investigation of scuffing damage in aluminum engines with thermal spray coatings. *Science Direct: Wear* [online]. 10. 5. 2005, č. 259 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: [http://ac.els-cdn.com/S0043164805001420/1-s2.0-S0043164805001420-main.pdf?\\_tid=0a71fef782b1d24eb4f731962b1bd6b1&acdnat=1337078270\\_0c34129394a6078f47625f898ae577ba](http://ac.els-cdn.com/S0043164805001420/1-s2.0-S0043164805001420-main.pdf?_tid=0a71fef782b1d24eb4f731962b1bd6b1&acdnat=1337078270_0c34129394a6078f47625f898ae577ba)
- [17] ENŽL, R., HOUDKOVÁ, Š., SUDOVÁ, J., BLÁHOVÁ, O. Náhrada tvrdého chromování žárovými nástřiky. *Metal 2002* [online]. 2002, č. 29, s. 4 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: [http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal\\_02/papers/29.pdf](http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_02/papers/29.pdf)
- [18] FEDERAL-MOGUL. *Automotive Applications* [online]. 2008 [cit. 27. 3. 2012]. Dostupné z: [http://www.federalmogul.com/korihandbook/en/pdf/section\\_67\\_en.pdf](http://www.federalmogul.com/korihandbook/en/pdf/section_67_en.pdf)
- [19] FISCHER, A. a BOBZIN, K. *Friction, Wear and Wear Protection* [online]. 2009 [cit. 2012-04-16]. ISBN 978-3-527-32366-1. Dostupné z: [http://books.google.cz/books?id=p0-YqHHbeUC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=p0-YqHHbeUC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [20] Furnace Applications: Plasma Nitriding. *Monometer* [online]. 2008 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <http://www.monometer.co.uk/plasma-nitriding>
- [21] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Šárka, ENŽL, Radek, BLÁHOVÁ, Olga. *Žárové nástřiky: Moderní technologie povrchových úprav* [online]. 2000 [cit. 2012-03-12]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/index.html>
- [22] Chemické niklování s nízkým obsahem fosforu. *Povrchové technologie a úpravy* [online]. 2009 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.povrchove-technologie.cz/cz/technologie/chemicky-nikl--nizke--p/>
- [23] International catalogues (pdf). ATLANTIC GRINDING WHEELS + HONING STONES. *Downloads* [online]. 1998-2010 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.atlantic-bonn.de/en/products/downloads/>





- [24] LEDRAPPIER, F., HOUZE, L., HEAU, C., GERSTENBERGER, J. Tenké povlaky pro snížení ztrát třením: tribologie povlaků PVD. *Metal 2008* [online]. 2008, č. 91, s. 9 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: [http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal\\_08/Lists/Papers/091.pdf](http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_08/Lists/Papers/091.pdf)
- [25] LEGG, K. O., SCHELL, J., RASTEGAR, F., NICHORS, G., ALTKORN, R. a CHANG, P. *Hard-Chrome Coatings: Advanced Technology for Waste Elimination* [online]. Evanston, 28. 10. 1997 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: [http://www.hazmat-alternatives.com/Documents/DoD-Reports/Cr\\_Plating\\_Alts/Pre-HCAT\\_Prog-HCA-Final\\_Rpt.PDF](http://www.hazmat-alternatives.com/Documents/DoD-Reports/Cr_Plating_Alts/Pre-HCAT_Prog-HCA-Final_Rpt.PDF)
- [26] Metallography: Introduction to Metallography. *PACE Technologies* [online]. 2010 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <http://www.metallographic.com/Technical/Metallography-Intro.html#top>
- [27] Nanoscale Physics and Devices Group at Brown University. *Magnetron Sputtering Technology* [online]. 2000 - 2011 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://physics.brown.edu/physics/researchpages/cme/supermag/knowledge/index.html>
- [28] PETRLÍK, Jindřich a PŘIBYLOVÁ, Jarmila. Chrom. *Arnika* [online]. 2011 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://arnika.org/chrom>
- [29] Peugeot 307 Break 1.6 HDI-16V Oxygo. RINGIER AXEL SPRINGER CZ A.S. *AUTOCZ: Moje.auto.cz* [online]. 2001-2012 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://moje.auto.cz/dzouzi/tristasedma.html>
- [30] Phosphate Coatings. *Imagineering Finishing Technologies* [online]. © 2003 [cit. 2012-02-23]. Dostupné z: <http://www.iftworldwide.com/solutions/phosphate.htm>
- [31] Phosphate Conversion Coatings. *Products finishing magazine* [online]. 29. 9. 2011 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.pfonline.com/articles/phosphate-conversion-coatings>
- [32] PICAS, J. A., FORN, A. a MATTHÄUS, G. HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves. In: *ScienceDirect* [online]. 2006 [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~leahem/EP/SupportingMaterials/Research/Electro%20Cr6%20Alternative/HVOFAltoCrPlate.pdf>
- [33] SVOBODA, K., DVOŘÁK, R. Technologie PVD patří v řadě odvětví mezi stěžejním. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 14. 6. 2006, č. 6 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-pvd-patri-v-rade-odvetvi-mezi-stezejni.html>
- [34] ŠTENGL, M. Nové motory Kia Kappa: Malé ráže. *Automobil Revue* [online]. 8. 8. 2011 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/technika/nove-motory-kia-kappa-male-raze\\_40128.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/technika/nove-motory-kia-kappa-male-raze_40128.html)





- [35] Thermal Spray Equipment. EUTENTIC CASTOLIN NORTH AMERICA. *Wear & Fusion Technology* [online]. 2004 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: [http://www.eutecticusa.com/wEutectic\\_usa/products/coating/Flame\\_coating equip.php?navid=71#](http://www.eutecticusa.com/wEutectic_usa/products/coating/Flame_coating equip.php?navid=71#)
- [36] Trocha teorie o chemickém niklování. *Brogal - Bezproudová (chemická) galvanika* [online]. © 2008 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.brogal.cz/Home/chemicke-niklovani>
- [37] Tvrdé chromování. BOMEX CZ. *Bomex* [online]. 1999 [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://www.bomex.cz/cz/3-technologie/8-tvrde-chromovani.html>
- [38] VOKÁČ, Luděk. Spalovací motor do muzea nepatří, úspěšně čelí nástupu elektromobilů. *Auto.idNES.cz* [online]. 26. 11. 2011 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/spalovaci-motor-do-muzea-nepatri-uspesne-celi-nastupu-elektromobilu-12k-/automoto.aspx?c=A111120\\_233041\\_automoto\\_vok](http://auto.idnes.cz/spalovaci-motor-do-muzea-nepatri-uspesne-celi-nastupu-elektromobilu-12k-/automoto.aspx?c=A111120_233041_automoto_vok)
- [39] VTN - SERVIS S.R.O. *Diamantové brusné kotouče* [online]. 2004-2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.vtn.cz/brusne-nastroje-diamantove/>
- [40] Wear-Resistant Peripheral Coatings: Chromium Plated Peripheries. FEDERAL-MOGUL CORPORATION. *Piston Ring Handbook* [online]. © 2008 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.federalmogul.com/korihandbook/en/index.htm>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CBN	kubický nitrid boru (Cubic Boron Nitride)
CKS	kompozitní povlak s chromovou matricí a keramickými disperzními částicemi
CLIN	řízená kapalinová iontová karbonitridace (Controlled Liquid Ionic Nitrocarburizing)
D	syntetický diamant (Diamond)
DLC	povlak vytvořený metodou PVD (Diamond Like Carbon)
ECC	katodické vylučování kompozitních povlaků (Electrodeposited Composite Coatings)
GDC	kompozitní povlak s chromovou matricí a diamantovými disperzními částicemi (Goetze Diamond Coating)
HVOF	vysokorychlostní nástřik plamenem (High Velocity Oxygen Fuel)
LPPS	plazmový nástřik za sníženého tlaku (Low Pressure Plasma Spraying)
PECVD	plazmově obohacené chemické nanášení par (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)
PVD	fyzikální nanášení par (Physical Vapor Deposition)
UPS	podvodní plazmatický nástřik (Underwater Plasma Spraying)
VPS	plazmový nástřik ve vakuu (Vacuum Plasma Spraying)